

---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr B.Eng.  
**David Morgenstern**

**Untersuchungen zum Hoch-  
geschwindigkeits- Laser-  
strahlschweißen mit Bearbei-  
tungsoptik und überlagerter  
Laserstrahloszillation**

Mittweida, 2016



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits- Laserstrahlschweißen mit Bearbeitungsoptik und überlagerter Laserstrahloszillation**

Autor:

**Herr B.Eng. David Morgenstern**

Studiengang:

**Maschinenbau**

Seminargruppe:

**MB14w1-A**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. Jan Drechsel**

Einreichung:

**Mittweida, 29.02.2016**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 14.04.2016**





## **Bibliografische Beschreibung:**

Morgenstern, David:

Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeits- Laserstrahlschweißen mit Bearbeitungsoptik und überlagerter Laserstrahloszillation. –2016. – 55 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau,  
Diplomarbeit, 2016

## **Referat:**

In dieser Arbeit sollen weiterführende Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaserschweißen ohne Verwendung von Zusatzwerkstoff mit einem 3 KW Singlemode Faserlaser durchgeführt werden. Ziel ist es die Verfahrensparameter zu ermitteln, unter welchen das Durchschweißen von hoch- bzw. niedriglegiertem Stahlblech im Stumpfstoß realisiert werden kann. Dazu werden experimentelle Untersuchungen angestellt, in denen durch eine Variation verschiedener Parameter wie bspw. der Schweißgeschwindigkeit, der Stahloszillation oder dem Lasereinstrahlwinkel, dieses Ziel erreicht werden kann. Dabei liegt der Fokus auf der Erreichung der maximal möglichen Schweißgeschwindigkeit. Durch eine Beeinflussung der Dampfkapillare und der Plasmadampffackel soll weites Optimierungspotential des Prozesses festgestellt werden. Abschließend wird die Festigkeit der erzeugten Schweißnähte mittels Mikrohärtemessung und Zugversuch bewertet.



# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziel – und Aufgabenstellung .....	2
1.3 Kapitelübersicht.....	2
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemeines.....	3
2.2 Schweißen mit Scannersystemen .....	3
2.3 Anlagentechnik.....	5
2.4 Wirtschaftlichkeit .....	6
<b>3 Versuchsvorbereitung .....</b>	<b>8</b>
3.1 Versuchsaufbau .....	8
3.1.1 Stahlquelle .....	8
3.1.2 Optische Komponenten .....	9
3.1.3 Schutzvorrichtungen, Crossdüse und Probenhalter.....	10
3.1.4 Achssystem.....	14
3.2 Strahlcharakterisierung.....	15
3.2.1 Leistungsmessung .....	15
3.2.2 Strahlvermessung .....	16
3.2.3 Strahlengang und Schweißkopfvorrichtung .....	18
3.2.4 Prozessführung .....	20
3.2.5 Schweißgeschwindigkeit .....	20
3.3 Probencharakterisierung .....	21

---

3.3.1	X5CrNi18-10 .....	21
3.3.2	DC04.....	22
3.3.3	Probengeometrie und -handling .....	23
3.4	Allgemeine Versuchsparameter.....	24
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen.....</b>	<b>25</b>
4.1	Untersuchungen zu überlagelter Bahnbewegung.....	25
4.1.1	Spaltüberbrückbarkeit.....	25
4.1.2	Erläuterung der Konturform .....	25
4.1.3	Ermittlung der optimalen Pendelfrequenz .....	26
4.2	Einflussgrößen auf den Schweißprozess.....	30
4.2.1	Keyholedynamik.....	30
4.2.1.1	Entstehungsprozess .....	30
4.2.1.2	Keyholemodellierung .....	31
4.2.1.3	Auswirkungen des Lasereinstrahlwinkels auf das Keyholeverhalten.....	31
4.2.2	Zusammenhang zwischen Material, Materialdicke, Schweißgeschwindigkeit und Lasereinstrahlwinkel.....	33
4.2.3	Einfluss der Crossdüse.....	34
4.3	Metallurgische Untersuchungen .....	37
4.3.1	DC04.....	37
4.3.2	X5CrNi18-10 .....	38
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung .....</b>	<b>39</b>
5.1	Unregelmäßigkeiten und Schweißfehler .....	39
5.2	Festigkeitsuntersuchungen.....	40
5.2.1	Mikrohärtemessung.....	40
5.2.1.1	X5CrNi18-10 .....	40
5.2.1.2	DC04.....	41
5.2.2	Zugversuch .....	43
5.2.2.1	Beurteilung der Bruchkanten .....	45
5.2.2.2	Auswertung und Interpretation.....	46
5.3	Ermittlung des optimalen Prozessfensters.....	51

---

<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>53</b>
	<b>Quellenangabe .....</b>	<b>X</b>
	<b>Anlagenverzeichnis.....</b>	<b>XII</b>
	<b>Anlagen A .....</b>	<b>XIII</b>
	<b>Anlagen B .....</b>	<b>XIV</b>
	<b>Anlagen C .....</b>	<b>XV</b>
	<b>Anlagen D .....</b>	<b>XVI</b>
	<b>Anlagen E .....</b>	<b>XX</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>XXVI</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung .....</b>	<b>XXVII</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Anordnung des experimentellen Versuchsaufbaus für Schweißversuche .....	7
Abbildung 3-2: Lasergerät.....	8
Abbildung 3-3: Galvometerscanner mit SiC Spiegel.....	8
Abbildung 3-4: Anordnung Crossjet und Crossdüse im Arbeitsraum .....	10
Abbildung 3-5: Spannvorrichtung 1 Schliffproben .....	12
Abbildung 3-6: Spannvorrichtung 2 Zugproben .....	12
Abbildung 3-7: Verhältnis von Geschwindigkeit zu Nutzstrecke bei Linearachse AE-ROTECH.....	13
Abbildung 3-8: Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der Linearachse AEROTECH.....	13
Abbildung 3-9: Resultierende mittlere Laserleistung nach passieren der Optikkomponenten bei verschiedenen Leistungsvorgaben.....	14
Abbildung 3-10: Strahlfleck des Laserspots bei Strahlvermessung .....	16
Abbildung 3-11: Darstellung der Bestandteile des Schweißkopfs.....	17
Abbildung 3-12: Darstellung des Strahlengangs .....	18
Abbildung 3-13: Darstellung der Prozessführung .....	19
Abbildung 3-14: Gefüge X5CrNi18-10.....	21
Abbildung 3-15: Gefüge DC04 .....	23
Abbildung 4-1: Beschreibung der Bahnbewegung .....	26
Abbildung 4-2: Strahlpendelverlauf Sinus .....	26
Abbildung 4-3: Versuchsaufbau Strahlpendelung .....	27
Abbildung 4-4: Amplitude bei Scannerfrequenz von 4 kHz bis 6 kHz .....	28
Abbildung 4-5: Amplitude bei Scannerfrequenz von 6,5 kHz bis 8 kHz .....	28
Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der Pendeldichte .....	29
Abbildung 4-7: Darstellung der Keyhole- Entstehung.....	30
Abbildung 4-8: Darstellung der Keyhole- Krümmung in Abhängigkeit von Schweißgeschwindigkeit und Lasereinstrahlwinkel .....	32
Abbildung 4-9: Untersuchungen zur Durchschweißung.....	33

Abbildung 4-10: Plasmadampffackel.....	34
Abbildung 4-11: Vergleich Blasdüsen Silvent im Prozess .....	35
Abbildung 4-12: Vergleich des Schweißergebnisses in Abhängigkeit des Düsenwinkels.....	36
Abbildung 4-13: Schematische Darstellung der Crossdüsenanordnung im Bereich des Werkstücks .....	36
Abbildung 4-14: Gefügedarstellung DC04 als Mikroschliff.....	37
Abbildung 4-15: Gefügedarstellung X5CrNi18-10 als Mikroschliff .....	38
Abbildung 5-1: Darstellung einer Auswahl verschiedener Schweißfehler .....	39
Abbildung 5-2: Messreihen Härteprüfung DC04.....	40
Abbildung 5-3: Mikrohärteanalyse DC04 bei senkrechtem Lasereinstrahlwinkel.....	41
Abbildung 5-4: Mikrohärteanalyse DC04 bei 25° Lasereinstrahlwinkel.....	42
Abbildung 5-5: Mikrohärteanalyse DC04 bei 45° Lasereinstrahlwinkel.....	42
Abbildung 5-6: Zugprüfung .....	43
Abbildung 5-7: Darstellung von Zugproben in 2,0mm Materialdicke.....	44
Abbildung 5-8: 3D Darstellung der Bruchkanten nach Zugversuch mit Keyence VHX 100 .....	45
Abbildung 5-9: Einfluss der Crossdüse auf die Zugfestigkeit von DC04 und X5CrNi18-10 in den Materialdicken 1,5mm und 2,0mm bei 45° Lasereinstrahlwinkel .....	47
Abbildung 5-10: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 1,0mm bei 0° Lasereinstrahlwinkel, linear .....	49
Abbildung 5-11: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 1,5mm bei 25° Lasereinstrahlwinkel, linear .....	49
Abbildung 5-12: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 2,5mm bei 45° Lasereinstrahlwinkel, gependelt .....	50
Abbildung 5-13: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit im Verhältnis zur Materialdicke für X5CrNi18-10 und DC04 mit den Parametern Scanner- und Crossdüseneinsatz sowie Lasereinstrahlwinkel .....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Herstellerangaben Lasergerät.....	8
Tabelle 3-2: Technische Daten Galvometerscanner .....	9
Tabelle 3-3: Ergebnisse Strahlvermessung .....	15
Tabelle 3-4: Zusammenhang zwischen Lasereinstrahlwinkel und Strahlfleck- querschnitt .....	16
Tabelle 3-5: Gewählte Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Materialdicke .....	19
Tabelle 3-6: Eigenschaften X5CrNi18-10 .....	20
Tabelle 3-7: Chemische Zusammensetzung X5CrNi18-10 .....	21
Tabelle 3-8: Eigenschaften DC04.....	22
Tabelle 3-9: Chemische Zusammensetzung DC04.....	22
Tabelle 3-10: Probengeometrie und -verwendung .....	23
Tabelle 3-11: Zusammenfassung der Versuchsparameter .....	24
Tabelle 4-1: Blasmusterausbreitung und Geschwindigkeitsverteilung Blasdüsen 973 und 705L Silvent.....	35
Tabelle 5-1: Übersicht über max. erreichbare Festigkeitswerte unter einer fest- gelegten max. Geschwindigkeit im prozentualen Vergleich mit Stand- ardwerkstoffkennwerten.....	46
Tabelle 5-2: Einfluss des Galvoscaners in Verbindung mit anderen Parametern auf die Schweißnahtfestigkeit.....	48



# Formelzeichen und Abkürzungen

## Formelzeichen

A	Bruchdehnung	%
A	Querschnittsfläche	mm <sup>2</sup>
A <sub>d0,86</sub>	Strahlfleckquerschnitt	μm <sup>2</sup>
d <sub>0,86</sub>	Fokusbereich	μm
d <sub>0,86(Z)</sub>	Spotdurchmesser bei Abstand zur Fokusebene	μm
F <sub>K</sub>	Klemmkraft	N
F <sub>zmaxØ</sub>	durchschnittliche max. Zugkraft	N
f	Brennweite	mm
f	Scannerfrequenz	Hz
HV01	Härtewert nach VICKERS Prüfkraft 0,1 N	N/mm <sup>2</sup>
M <sup>2</sup>	Beugungsmaßzahl (Maß für Strahlqualität)	-
P	Laserleistung	W
R	elektrischer Widerstand	Ω
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
R <sub>p0,2</sub>	Dehngrenze	N/mm <sup>2</sup>
S	Schrittweite	μm
s	Materialdicke	mm
T	Periodendauer	sec
u	Amplitude	mm
v	Schweißgeschwindigkeit	m/s
v <sub>B</sub>	Bahngeschwindigkeit	m/s
v <sub>f</sub>	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
Y	Pendelbreite	mm
ΔY	Konturbreite	mm
z	Abstand zur Fokusebene	mm

$z_R$	Rayleighlänge	mm
$\alpha$	Lasereinstrahlwinkel	°
$\beta$	Neigungswinkel der Crossdüse	°
$\sigma$	Spannung	N/mm <sup>2</sup>
$\varrho$	Dichte	g/cm <sup>3</sup>
$\lambda$	Laserwellenlänge	nm

## Abkürzungen

C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Fe	Eisen
MAG	Metall Aktivgas Schweißen
MIG	Metall Inertgas Schweißen
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silicium
SiC	Silicium Karbonat
SM	Single Mode
YLR/ YLP	Ytterbium pulsed Fiber Laser
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram Inertgas Schweißen

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der Laser als Werkzeug zur industriellen Produktion und die damit verbundenen Fertigungsverfahren konnten in den letzten Jahrzehnten verstärkt an Bedeutung gewinnen. Vor allem das Laserschweißen konnte sich in wichtigen Branchen, wie im Fahrzeug- und Anlagenbau sowie in der Elektronikfertigung und der Feinwerktechnik, etablieren. Aufgrund der geraden, linienförmigen Schweißverbindung ergeben sich funktional höhere Nahtfestigkeiten und eine insgesamt verbesserte Steifigkeit in der Struktur. Zudem verursacht der geringe Wärmeeintrag eine kleine Wärmeeinflusszone sowie eine reduzierte Schwächung des Grundwerkstoffs bei geringem Verzug. Die gute Automatisierbarkeit, die kurzen Taktzeiten und die qualitativ hochwertigen Nahtgütern stellen fertigungstechnische Vorteile dar.

Bisher scheuten Unternehmen aufgrund der hohen Investitionskosten, des hohen Energieverbrauchs und dem schlechten Verhältnis von Strahlleistung zu Strahlqualität den Einsatz. Mit Einführung industrietauglicher Faserlaser fand jedoch ein großer technischer Umbruch in der Laserschweißtechnik statt, da jetzt Lasersysteme mit hoher Strahlqualität und hohen Strahlleistungen zu gleichzeitig niedrigeren Kosten bei verbesserter Energieeffizienz zur Verfügung stehen. Anteil daran hat auch verbessertes Equipment zur Strahlführung und -formung. Wo vor wenigen Jahren noch Fokussdurchmesser von mehreren hundert Mikrometern den Standard markierten, sind heutzutage Durchmesser unter 10  $\mu\text{m}$  Stand der Technik.

Diese hochbrillanten Strahlqualitäten haben eine verbesserte Tiefschweißfähigkeit und wesentlich höhere Genauigkeiten, mit denen positioniert und bearbeitet werden kann, zur Folge. Bereits kleine Laserstrahlauslenkungen führen aufgrund der verhältnismäßig großen Arbeitsabstände zu einer deutlich größeren Versatzbewegung des Strahls auf dem Bauteil. Mit dynamischen Strahlauslenkungssystemen wie bspw. Scannersystemen kann die Strahlauslenkung mit hohen Geschwindigkeiten realisiert werden. Diese Systeme haben dazu den Vorteil einer guten Spaltüberbrückung, sodass auf Zusatzwerkstoff verzichtet werden kann. Dies stellt, in Kombination mit immer leistungsfähiger werdenden Faserlasern, einen immensen Vorteil in der blechverarbeitenden Industrie dar.

Die aktuelle Forschungsarbeit erschließt immer neue Anwendungsgebiete für diese Technologie und ist stets bemüht, die physikalischen und technischen Grenzen weiter auszuloten, um effiziente und großserientaugliche Laserapplikationen zu entwickeln.

## 1.2 Ziel- und Aufgabenstellung

In dieser Arbeit sollen weiterführende Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit überlagerter Bahnbewegung ohne Verwendung von Zusatzwerkstoff mit einem 3 KW Singlemode Faserlaser durchgeführt werden.

Ziel ist es, die Verfahrensparameter zu ermitteln, unter welchen das Durchschweißen von hoch- bzw. niedriglegiertem Stahlblech im Sumpfstoß realisiert werden kann. Dazu werden experimentelle Untersuchungen angestellt, in denen durch eine Variation verschiedener Parameter wie bspw. Schweißgeschwindigkeit, Materialdicke oder Lasereinstrahlwinkel, dieses Ziel erreicht werden kann. Dabei liegt der Fokus auf der Erreichung der maximal möglichen Schweißgeschwindigkeit.

Zur Ermittlung der Verfahrensgrenzen wird besonders auf Schweißnahtdefekte oder Unregelmäßigkeiten geachtet, welche bspw. durch Effekte wie Humping, Spiking oder eine unzureichende Durchschweißung hervorgerufen werden. Durch eine Beeinflussung der Dampfkapillare im Keyhole soll weites Optimierungspotential des Prozesses festgestellt werden.

Zur Auswertung und Verifizierung der erhaltenen Daten ist es notwendig, Schliffproben anzufertigen sowie Festigkeitsuntersuchungen der Schweißnähte durchzuführen.

## 1.3 Kapitelübersicht

Die Diplomarbeit besteht aus den folgenden sechs Kapiteln.

Nach der allgemeinen Einleitung des ersten Kapitels werden im **Kapitel 2** der aktuelle Stand in Forschung und Anlagentechnik für das Laserschweißverfahren mit überlagerter Bahnbewegung aufgezeigt.

Anschließend werden im **Kapitel 3** die Vorbereitungsmaßnahmen und das zum Einsatz kommende Equipment für das spätere Experiment dargestellt. Auf diese Weise soll eine bessere Vergleichbarkeit der Untersuchungen gewährleistet werden.

Die konkreten experimentellen Untersuchungen zur Erzeugung der geometrischen Pendelkontur und der Keyholedynamik werden im **Kapitel 4** beschrieben.

Im **Kapitel 5** erfolgt die Umsetzung der weiterführenden Untersuchungen zur Auswertung der Schweißversuche. Dabei wird auf aufgetretene Schweißnahtunregelmäßigkeiten eingegangen sowie die Charakteristik und Belastbarkeit der Schweißnähte mittels Härtemessung und Zugversuch überprüft.

Schließlich werden im **Kapitel 6** die Resultate der einzelnen Kapitel der Diplomarbeit zusammengefasst. Außerdem wird ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und Prozessoptimierungen gegeben.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Allgemeines

In der DIN EN 1011-6 wird das Laserstrahlschweißen als Schmelzschweißverfahren definiert, bei dem die Naht durch eine Schmelzzone und durch Wärmeeinflusszonen gekennzeichnet ist [1]. Das Laserstrahlschweißen wird oft als Tiefschweißverfahren bezeichnet. Dabei ist ein Strahl mit sehr hoher Leistungsdichte erforderlich, welcher den Werkstoff an der Strahlauftreffstelle verdampft. Aufgrund des hohen Dampfdrucks ist der Laserstrahl in der Lage, einen tiefen zylindrischen Kanal (Keyhole) zu erzeugen. Die Kanalwände sind mit geschmolzenem Werkstoff überzogen. Bei entsprechender Prozesssteuerung bewegt sich der Kanal entlang der Nahtfuge. Wärme- und Materialausbreitung verlaufen überwiegend zweidimensional. Der Werkstoff schmilzt an der Vorderseite des Kanals und bewegt sich zur Rückseite, wo er zum Schmelzgut erstarrt. Eine geringe Werkstoffmenge verdampft oder wird als Spritzer in Richtung Strahlachse herausgeschleudert. Die Tiefschweißtechnik ist die übliche Verfahrensvariante zum vollständigen und teilweisen Durchschweißen bei großen Wanddicken. Die Energieübertragung wird in erster Linie von zwei Faktoren beeinflusst, zum einen von partieller Reflexion der Strahlenergie an der Oberfläche des Werkstückes und der Schmelze und zum anderen vom Entstehen von verdampfenden Elementen und/ oder einer Plasmawolke.

Laserstrahlen werden an der Werkstückoberfläche reflektiert. Die Höhe der reflektierten Energie hängt von der Oberflächenbeschaffenheit (im mikroskopischen Bereich) z.B. von der Oberflächenrauheit und Oberflächentemperatur ab. Der Reflektionsanteil kann sehr hoch sein, bis zu 90 % bei polierten Werkstücken, bei Raumtemperatur und einer Wellenlänge von 1  $\mu\text{m}$ . Der Anteil sinkt unter 50 % bei geringeren Wellenlängen und weniger reflektierenden Oberflächen. Ist der Strahl bei entsprechender Leistung allerdings in der Lage einen Tiefschweißeffekt zu erzielen, so spielt die Reflexion nur eine untergeordnete Rolle. Der Einfluss der Reflexion durch das Werkstück verliert bei größeren Leistungen und höherer Qualität des Laserstrahles an Bedeutung. Wird ein prozentual hoher Anteil der Strahlleistung reflektiert, so kann der Prozess destabilisiert und der Tiefschweißeffekt örtlich beeinträchtigt werden. Beim Laserstrahlschweißen wird der Werkstoff teilweise verdampft, was sich als Dampf über dem Kanal bemerkbar macht. Hochleistungslaser erzeugen so hohe Temperaturen, dass ein Teil dieses Dampfes ionisiert wird und über dem Keyhole eine Plasmawolke entsteht, welche den Strahl schwächen kann. Zur Abhilfe wird das Plasma deshalb in der Regel weggeblasen. Dazu können Druckluft bzw. diverse Schutzgase wie Helium, Stickstoff oder Argon eingesetzt werden. Das Plasma kann zwar nicht vollständig unterdrückt werden, aber das Schweißen ist trotzdem möglich [1].

## 2.2 Schweißen mit Scannersystemen

In der Industrie stellt das Schweißen mit Scannersystemen zur hochdynamischen Strahlablenkung eine attraktive Alternative zur Bewegung des Bearbeitungskopfes oder des Werkstücks zur Strahlpositionierung dar. Dabei wird der Laserstrahl über ein oder zwei galvanometrisch bewegte Drehspiegel abgelenkt und positioniert. Durch die Winkeländerungen der Spiegel wird der Strahl geführt. Es entsteht ein Bearbeitungsfeld, in dem hochdynamisch und präzise geschweißt werden kann. Die Feldgröße hängt vom Arbeitsabstand und Ablenkwinkel ab. Die Fokussierung erfolgt hierbei über ein Fokussierobjektiv. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit und Größe des Fokusedurchmessers am Werkstück hängt von Abbildungseigenschaften der Optik, Lasereinstrahlwinkel, Strahlqualität und Material ab [2].

Neueste Forschungen beschäftigen sich überwiegend mit Scannertechnologien, welche zwei oder mehr Galvometerscanner miteinander kombinieren [1]. Dieses neue Technologiefeld hat für den Anwender eine Vielzahl von Vorteilen. Einer davon ist die gute Automatisierbarkeit des Prozesses, sodass aufgrund der flexiblen Strahlführung bei Faserlasern Roboter, Scanner und Faserlaser eine perfekte Einheit bilden. Zudem kann im Vergleich zu bewegten Werkstückachsen wesentlich höhere Schweißgeschwindigkeiten bei oftmals niedrigeren Investitionskosten realisiert werden. Weniger komplexe zweidimensionale Bauteile können einfach mit einem Standardscanner in Verbindung mit einem leistungsstarken Faserlaser geschweißt werden. Erfolgte die Scannersteuerung bislang meistens über zusätzliche externe Programmier- oder Überwachungssysteme, so ist diese nun in den Laser integriert. Durch die Nutzung eines zusätzlichen Optiksystems kann der Fokuspunkt auch in Z- Richtung äußerst dynamisch verschoben werden. Auf diese Weise können komplex geformte dreidimensionale Bauteile ohne Bewegung des Bearbeitungskopfes oder des Bauteils robotergeführt punktgeschweißt werden. Durch die sehr schnellen Versatzbewegungen entfallen Nebenzeiten nahezu vollständig, was eine fast hundertprozentige Auslastung des Lasergeräts während der verfügbaren Fertigungszeit zur Folge hat [2].

Die zweite Entwicklungsschiene bilden Systeme, die während des Schweißens die Scanneroptik in Verbindung mit einem Roboter über ein Werkstück führen können. Diese „fliegende“ Bewegung prägte den Begriff des „Welding on the fly“ [3]. Roboter und Scanneroptik synchronisieren dabei in Echtzeit ihre Bewegungen aufeinander. Der Einsatz des Roboters vergrößert dabei den Arbeitsraum deutlich und ermöglicht eine echte dreidimensionale Bauteilbearbeitung. Als Strahlquelle kommen dabei ebenfalls Hochleistungs- Scheiben- oder Faserlaser mit hoher Strahlqualität zum Einsatz. Ein oder mehrere flexible Faserkabel (Laserlichtkabel) führen dabei die Laserstrahlung vom Lasergerät zu den Bearbeitungsstationen.

Darüber hinaus erfährt das Schweißen mit überlagerter Bahnbewegung wachsende Bedeutung. Mit dieser Technologie ist es möglich, große Fügespalten wirkungsvoll zu überbrücken und gleichzeitig einen stabilen Schweißprozess zu generieren, ohne eine

separate Zuführung von Zusatzwerkstoff zu benötigen. Mit dieser Methode ist es möglich, einen direkten Einfluss auf die Schweißnahtgeometrie zunehmen und dadurch die Qualität der Nahtober- und unterraupe positiv beeinflussen zu können. Des Weiteren kann dadurch Effekten wie Humping und Spiking, wie sie bei höheren Schweißgeschwindigkeiten auftreten und die Nahtgeometrie und -festigkeit beeinträchtigen, entgegen gewirkt werden. In ersten Veröffentlichungen wurde dabei das Schweißen mit einer oszillierenden Bahnbewegung zum Tiefschweißen von Stahlblech untersucht. Dabei wurden Fügespalten von bis zu 80 µm überbrückt [3]. Mittlerweile wurde jedoch festgestellt, dass sich eine pendelnde Bahnbewegung besser auf den Schweißprozess auswirkt und die Verfahrensgrenzen hinsichtlich der maximal erreichbaren Bearbeitungsgeschwindigkeiten weiter nach hinten verschieben.

Das Schweißen mit Scannersystemen ermöglicht es, verschiedene Stoßarten zu realisieren. Diese sind u.a.: Stumpfstoß, Überlappstoß und Kehlnahtverbindung. Zudem ist es möglich, verschiedene Werkstoffe miteinander zu verschweißen. Eine dabei mehrfach untersuchte Kombination [4,5] stellt dabei die Verbindung von Domex 700 und Weldox 960 (hochfeste Konstruktionsstähle) dar. Ebenso werden Edelstahl- Kupfer-Kombinationen untersucht [6].

Das Laserschweißen mit überlagerter Bahnbewegung hat ebenfalls das Potenzial, die für sehr große Bauteile und Spezialanwendungen im Stahlbau bereits im Einsatz befindliche Technologie des Laserhybridschweißens mittelfristig abzulösen. In diesem Verfahren wird der Laserstrahl mit einem anderen geeigneten Verfahrenspartner wie MIG-, MAG- oder WIG- Schweißen bzw. Plasmaschweißen, kombiniert. So werden aktuell beispielsweise im Schiffbau große Blechplatten mit bis zu 30 m Länge und 15 mm Dicke verschweißt [7]. Die Spaltabstände zwischen den Platten sind so groß, dass der Laserstrahl sie allein bei linearer Bahnbewegung nicht überbrücken kann. In diesem Fall wurde MIG- Schweißen und Laserschweißen miteinander kombiniert. Der Laser liefert dabei die hohe Leistungsdichte für große Nahttiefen, erlaubt hohe Schweißgeschwindigkeiten und reduziert die Wärmeeinbringung und den Verzug. Der MIG- Brenner überbrückt den Spalt und schließt die Fuge durch die Verwendung von Zusatzwerkstoff. Insgesamt gesehen ist das Hybridschweißen schneller als MIG- Schweißen allein, und die Teile verziehen sich weniger. Dieses Verfahren wird zudem in weiteren Branchen wie bspw. im Schienenfahrzeugbau, im Kranbau, im LKW- Bau und in der Schwerindustrie eingesetzt. Mit dem Laserschweißen mit überlagerter Bahnbewegung könnte auf das ergänzende MIG- Schweißverfahren verzichtet und gleichzeitig noch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden.

## 2.3 Anlagentechnik

Das Laserschweißen mit Scannersystemen ermöglicht heute hochproduktive und flexible Anlagenkonzepte, die das Schweißen in der Serienproduktion schneller, präziser und damit wirtschaftlicher machen als herkömmliche Schweißverfahren.

Die Anlagentechnik hat innerhalb der letzten Jahrzehnte einen starken Wandel durchlaufen. Für moderne Scannerschweißanwendungen werden heute hauptsächlich Monomode und Multimode Faserlaser in einem Leistungsbereich zwischen 1 KW und 15 KW eingesetzt [8]. Die aktuelle Forschung geht sogar schon in Richtung 50 KW. Bisher eingesetzte Gaslaser wie bspw. CO<sub>2</sub>- Laser werden mittlerweile nur noch überwiegend für Schneid- und Bohranwendungen genutzt. Für die Fokussierung des Laserstrahls werden Festoptiken verwendet. Wobei die F- Theta Optik einen Meilenstein der Entwicklung markiert, da sie in Kombination mit einem Scannersystem (Verwendung von zwei Scannern) eine dynamische Fokusverschiebung realisiert, was es ermöglicht, sowohl eine überlagerte Stahlbewegung als auch eine Vorschubbewegung entlang des Fügespalts zu generieren [9]. Die Scannersysteme werden kontinuierlich hinsichtlich ihrer Massenträgheit, Schwenkfrequenz, Auslenkung, Dynamik und Wiederholgenauigkeit optimiert [10].

## **2.4 Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit des Laserschweißens ist zunächst von der Tatsache geprägt, dass es sich um ein schnelles Verfahren handelt. Der kurze Zeitbedarf für den Schweißvorgang ermöglicht eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit. Dazu kommen niedrige Betriebskosten, nicht zuletzt aufgrund des geringen Energiebedarfs des Faserlasers. Hinzu kommt die Wartungsfreiheit des Lasergeräts.

Verglichen mit anderen Fügeverfahren wie dem Schrauben, Nieten, Löten oder Punktschweißen sind die Investitionen in die maschinelle Ausrüstung allerdings weitaus höher, sodass die Amortisationsdauer entsprechend länger ausfällt und eine entsprechende Auslastung der Laseranlage voraussetzt. Zu berücksichtigen sind bei der Amortisationsrechnung jedoch auch verfahrensbedingte Einsparungen. Weil die wärmebeeinflusste Zone um die Schweißstelle nur kleine Ausmaße annimmt, ist ein nachträgliches Richten oder Überschleifen durch zusätzliche Arbeitsgänge überflüssig. Zusatzstoffe wie Lot oder Flussmittel sind nicht nötig. Zudem stellt die hohe Reproduzierbarkeit der Schweißverbindungen das markanteste Merkmal für die Prozesssicherheit des Verfahrens dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die einmal für eine Schweißverbindung ermittelten Parameter selbst nach vielen hundert Vorgängen ihre Gültigkeit behalten. Voraussetzung ist natürlich eine entsprechende Wartung und regelmäßiges Wechseln der Verschleißteile sowie eine funktionsfähige Prozessüberwachung. Mit Mess- und Überwachungsgeräten können der aktuelle Zustand und alle Einstellungen permanent kontrolliert werden. Dabei soll eine möglichst gleichmäßige Güte der Schweißverbindungen erreicht werden.

Besonderes Sparpotential bietet die hohe Automatisierbarkeit des Laserstrahlschweißens als hochproduktives Fügeverfahren. Der Einsatz von Robotern und flexiblen Fertigungsstraßen erhöht die Produktivität und Prozesssicherheit und senkt dabei die Kosten für den Personaleinsatz.



## 3 Versuchsvorbereitung

### 3.1 Versuchsaufbau

Die Abbildung 3-1 stellt den Versuchsaufbau für die Schweißversuche dar. Ihr sind die Komponenten für die Strahlführung und –formung zu entnehmen, sowie Spann- und Schutzvorrichtung und Komponenten der visuellen Versuchsraumüberwachung und Probenausrichtung. Strahlquelle, Steuerrechner und Scanneransteuerung befinden sich dabei außerhalb der Schutzumhausung der Laseranlage und sind daher nicht mit abgebildet.

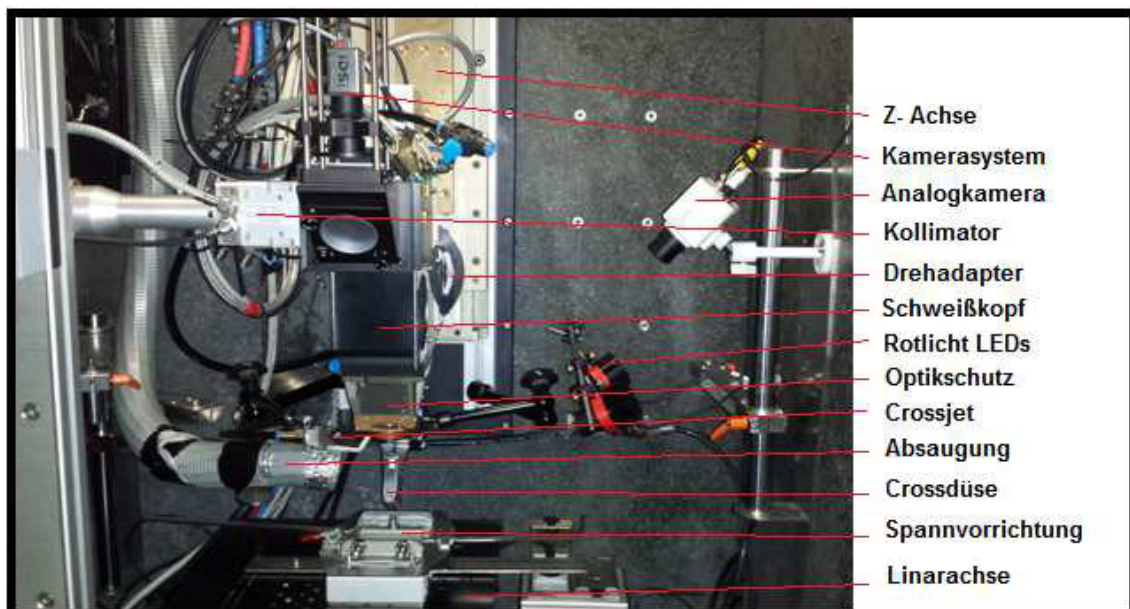


Abb. 3-1: Anordnung des experimentellen Versuchsaufbaus für Schweißversuche

#### 3.1.1 Strahlquelle

Zur Realisierung der experimentellen Schweißversuche wurde ein wassergekühlter, diodengepumpter 3 KW Singlemode Faserlaser der Firma IPG Photonics genutzt, wie er in Abbildung 3-2 einzusehen ist. Dieser eignet sich besonders sowohl für industrielle Anwendungen, als auch durch seine hochbrillante Stahlqualität für den Einsatz in Forschungsbereichen. Der Laser eignet sich laut Hersteller für folgende Anwendungen: naht- und punktschweißen; präzisionsschneiden; hochgeschwindigkeitsbohren, abkannten, sintern, löten und gravieren [11]. Der Kollimator ist dabei nicht in das Lasersystem integriert, sondern wird über eine Steckverbindung extern angeschlossen.

Die nachfolgende Tabelle fasst die Herstellerangaben des Lasers zusammen:

Parameter	Wert
Bezeichnung	YLR-3000-SM
Faser	Ytterbium dotierte Doppelkernfaser
Wellenlängenbereich	1068 nm und 1080 nm
Leistungsbereich	300 W und 3000 W
Stahlqualität	1,1 bis 1,25

Tab. 3-1: Herstellerangaben Lasergerät



Abb. 3-2: Lasergerät

### 3.1.2 Optische Komponenten

#### Galvometercanner

Ein Galvometerscanner ist ein hochdynamischer Drehantrieb, entwickelt für optische Anwendungen. Der verwendete Scanner mit der Bezeichnung „dynAXIS L“ kommt von Scanlab und ist speziell auf schnelle und präzise Positionierung von Spiegeln zur Ablenkung von Laserstrahlen ausgelegt. Er besteht aus einem Motorteil und einem hochgenauen Positionsdetektor. Die Motoreinheit ist dabei genau auf das Trägheitsmoment des Spiegels abgestimmt, sodass das System über ein günstiges Einschwingverhalten verfügt. Verwendet wird ein SiC beschichteter Spiegel, welcher hinsichtlich seiner Reflexionseigenschaften, Steifigkeit und Ebenheit optimal geeignet ist [10]. Er kann über eine Regelkarte durch ein analoges Signal mit einer Spannung zwischen 0 und 10V angesteuert werden.

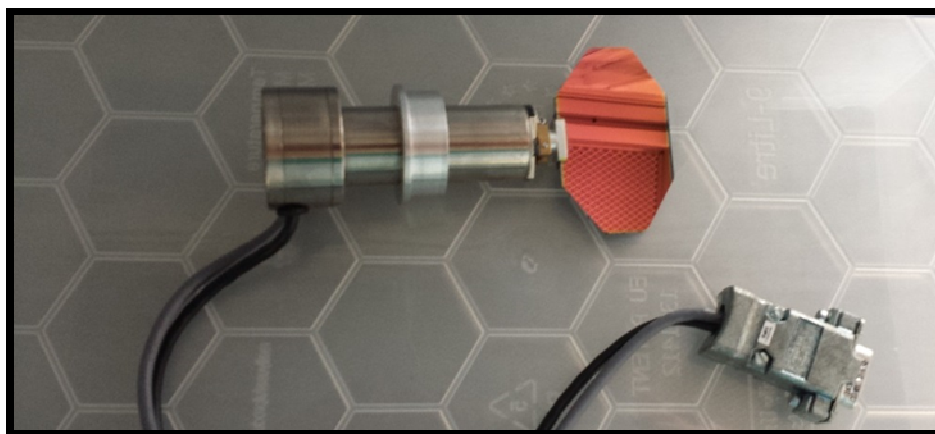


Abb. 3-3: Galvometerscanner mit SiC Spiegel

Parameter	Wert
Rotorträgheitsmoment	5,1 g*cm <sup>2</sup>
max. Strom RMS	5 A
max. Strom Puls	15 A
max. Auslenkwinkel	± 12°
Gewicht	400 g
Arbeitstemperatur	5 – 50 °C
Trägheitsmoment (Last)	
empfohlen	8 g*cm <sup>2</sup>
maximal	25 g*cm <sup>2</sup>
Dynamik (mit Scanlab Regelkarte)	0,7 ms
Sprungantwort bei 1% Vollausschlag	
Signalspannung	0 – 10 V

**Tab. 3-2: Technische Daten Galvometerscanner**

### Kollimationsmodul

Das zum Einsatz kommende Kollimationsmodul „Kolxx 12366“ der Firma HighYAG hat eine Brennweite von  $f = 272$  mm. Seine Aufgabe ist es, die von der optischen Faser ankommende Laserstrahlung zu richten und zu parallelisieren. Er ist für Wellenlängenbereiche von  $\lambda = 1025$  bis 1080 nm geeignet.

### Optik

Verwendung findet eine F250 Optik aus Quarzglas der Firma PRECITEC. Die reale Brennweite beträgt dabei ca. 230 mm. Die Funktion der Optik ist es, die ankommende Laserstrahlung im Bearbeitungspunkt zu fokussieren und somit für den Schweißprozess nutzbar zu machen.

### Umlenkspiegel

Um den parallelisierten Laserstrahl vom Kollimationsmodul auf den Scanner zu lenken, wird mit dem Umlenkspiegel ein weiteres Bauteil benötigt. Dieser hat die Funktion, den Strahl verlustarm im 90° Winkel abzulenken.

## 3.1.3 Schutzvorrichtungen, Crossdüse und Probenhalter

### Optikschutzmodul

Zum Schutz der Optik vor etwaigen Rückreflexen wird das Unterteil eines Hochleistungsschweißkopfes genutzt. Darin integriert ist ein Schutzglas, welches diese Aufgabe

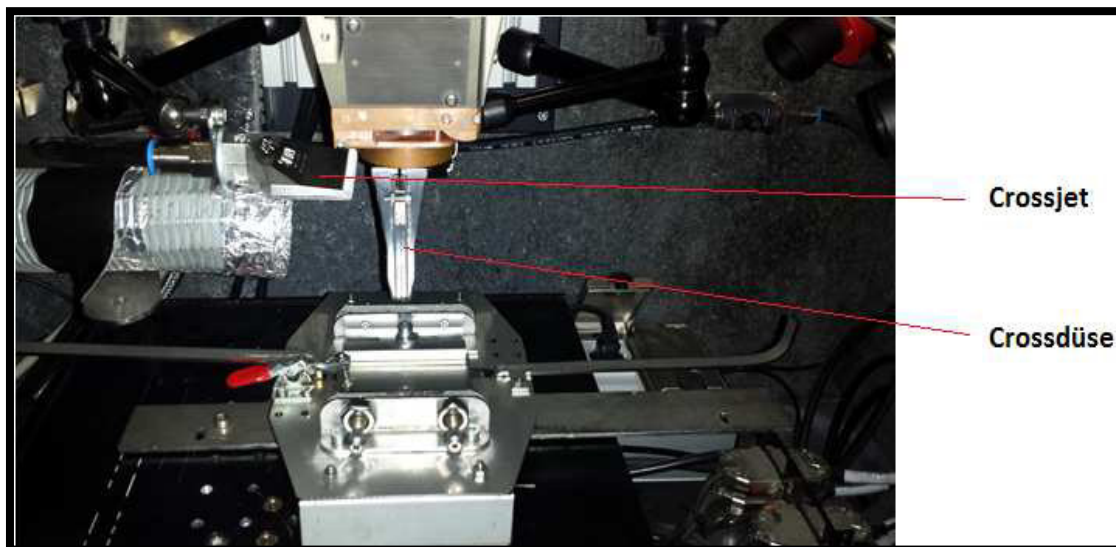
erfüllt. Zudem befinden sich Anschlüsse für Schutzgas an diesem Bauteil, welche im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch nicht genutzt werden.

### **Crossjet**

Als Crossjet dient eine Flachstrahldüse vom Typ 920A der Firma Silvent. Durch diese wird Druckluft mit einem maximalen Druck von bis zu 8 bar geleitet. Die Hauptaufgabe des Crossjets ist der Schutz der optischen Komponenten vor Schweißspritzern, Funken und entstehendem Schmauch. Er wirkt damit ergänzend zum Schutzglas im bereits beschriebenen Optikschutzmodul. Um dies zu erreichen wird ein breit gefächerter Luftstrom erzeugt, welcher die Optik vor genannten Gefährdungen abschirmen soll [12].

### **Crossdüse**

Als Crossdüse wurden sowohl eine Lavaldüse als auch eine Flachstrahldüse untersucht. Wie im Kapitel 4.2.3 beschrieben, wurde sich im späteren Verlauf der experimentellen Untersuchungen für die Flachstrahldüse des Typs 973 vom Hersteller Silvent entschieden. Diese wird jedoch nicht horizontal, sondern vertikal ausgerichtet und kann sich dem eingestellten Winkel des Schweißkopfes anpassen. Die Crossdüse hat die Funktion der beim Schweißen entstehenden Dampfplasmafackel entgegenzuwirken, welche einen Teil der Laserstrahlung absorbiert und somit für eine verminderte Eindringtiefe verantwortlich ist. Durch einen Luftstrom mit max. 8 bar wird diese weggeblasen. Um einen möglichst hohen Volumenstrom zu kreieren, wurde die untere Hälfte der Düse abgeklebt. Zur Ermittlung des optimalen Winkels der Crossdüse, wurden Versuche mit verschiedenen Winkeleinstellungen durchgeführt. Mit der Erkenntnis, dass sich der optimale Winkel auf 60° beläuft.



**Abb. 3-4: Anordnung Crossjet und Crossdüse im Arbeitsraum**

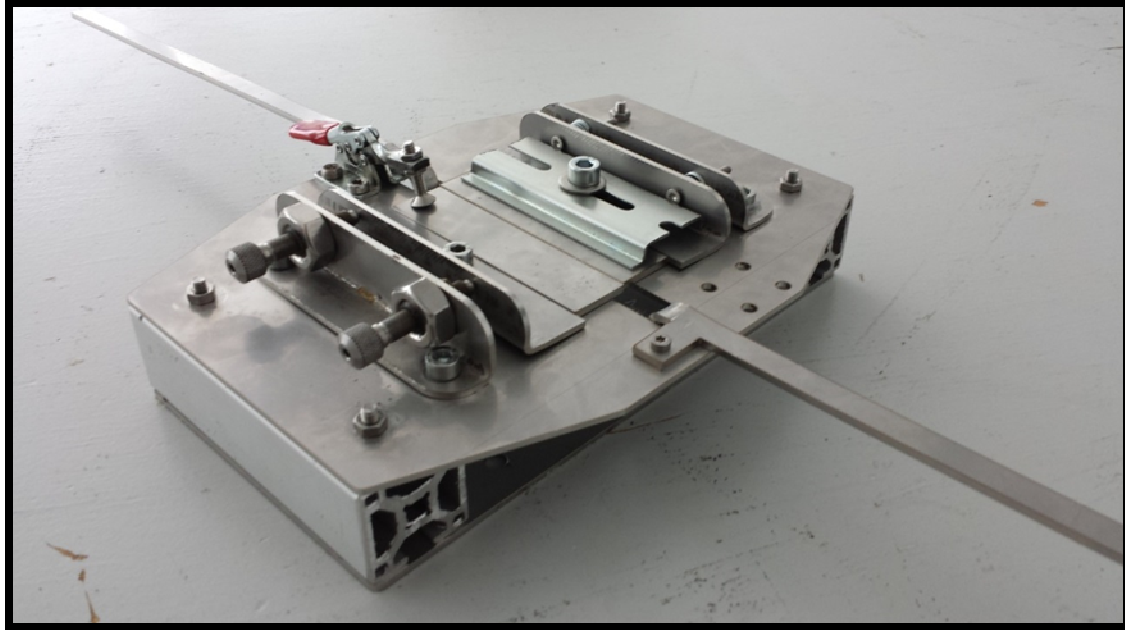
## Probenhalterungen

Zur Durchführung der Schweißversuche war es notwendig, im Vorfeld Probenspannhalterungen zu konzipieren und anzufertigen (siehe Abb.: 3-6 und 3-7). Hauptaugenmerk lag hierbei sowohl auf einer definierten Positionierung der Probenbleche bei Stumpfstoßschweißungen trotz ungeschliffener Körperkanten, als auch auf einer variablen Positionierbarkeit der Vorrichtung auf der Linearachse. Überdies musste gewährleistet werden, dass die Positionierung der Crossdüse auch bei geringen Abständen zu Keyhole und Plasmadampffackel gewährleistet bleibt. Eine möglichst niedrige Verspannung der Probenbleche war daher eine Prämisse. Die Probe wird zunächst über vertikale Spannelemente eingespannt. Zusätzlich kann über eine Einstellschraube mikrometergenaue Justage vorgenommen und eine Winkelverschiebung von  $\pm 10^\circ$  zur X-Achse (Vorschubrichtung des Werkstücks) eingestellt werden. Zur Einbringung einer ausreichend hohen Klemmkraft, die ein horizontales Verrutschen verhindert, wurden Vertikalschnellspanner vom Typ „225-U“ der Firma Destaco mit jeweils  $F_K = 2220 \text{ N}$  sowie eine selbstgebaute Klemmspange (Spannvorrichtung 1) verwendet. Auf die üblichen Andruckspindeln vom Typ „225208-M“ mit einem „weichen“ Neopren-Kopf musste verzichtet werden. Er wurde gegen den Typ „507206-M“ mit einem Kopf aus verzinktem Stahl ausgetauscht, da ansonsten Schmoren und seitliches Verrutschen nicht ausgeschlossen werden konnte [13]. Als Schutz der Linearachse vor der Laserstrahlung wurden 4 mm starke Schutzbleche angefertigt. Um die Kanten der Vorrichtung zu schützen, wurden ebenfalls Schutzbleche verwendet. Diese wurden zudem je nach Vorrichtungstyp gestapelt, um eine höhere Sicherheit zu erzielen und gleichzeitig den Laserstrahl zu defokussieren. Zur Gewährleistung der exakten Positionierung der zu verschweißenden Körperkanten bei einer Stumpfstoßschweißung, gilt es, eine bestimmte Abfolge beim Spannvorgang einzuhalten:

### *Schliffproben:*

Zunächst wird ein Probenblech aufgelegt und von Hand gegen das untere Spannelement gedrückt, um anschließend mittels des Vertikalschnellspanners fixiert zu werden. Im zweiten Schritt wird das zweite Probenblech zwischen oberem Spannelement und dem bereits eingelegtem Probenblech positioniert. Das obere Spannelement wird dazu nach hinten verschoben, wodurch sich die darin integrierten Federn komprimieren und nach abgeschlossener Positionierung für vertikale Druckspannung sorgen. Im nächsten Schritt wird nun auch das zweite Probenblech horizontal fixiert. Dazu wird die selbstgebaute Spannklemme mittels einer Schraube auf die Probenoberfläche gedrückt. Nachdem das Probenpaar nun sowohl vertikal als auch horizontal eingespannt ist, muss mithilfe der Mikrometerschrauben und unter Nutzung der im Schweißkopf integrierten Digitalkamera der Laserstrahl mittig auf den Probenspalt und über die gesamte Probenlänge ausgerichtet werden. Zum Abgleich des Kamerabildes mit dem realen Laserstrahlverlauf wird ein Fadenkreuz genutzt, mit dessen Hilfe die Kamera ausgerichtet wird.

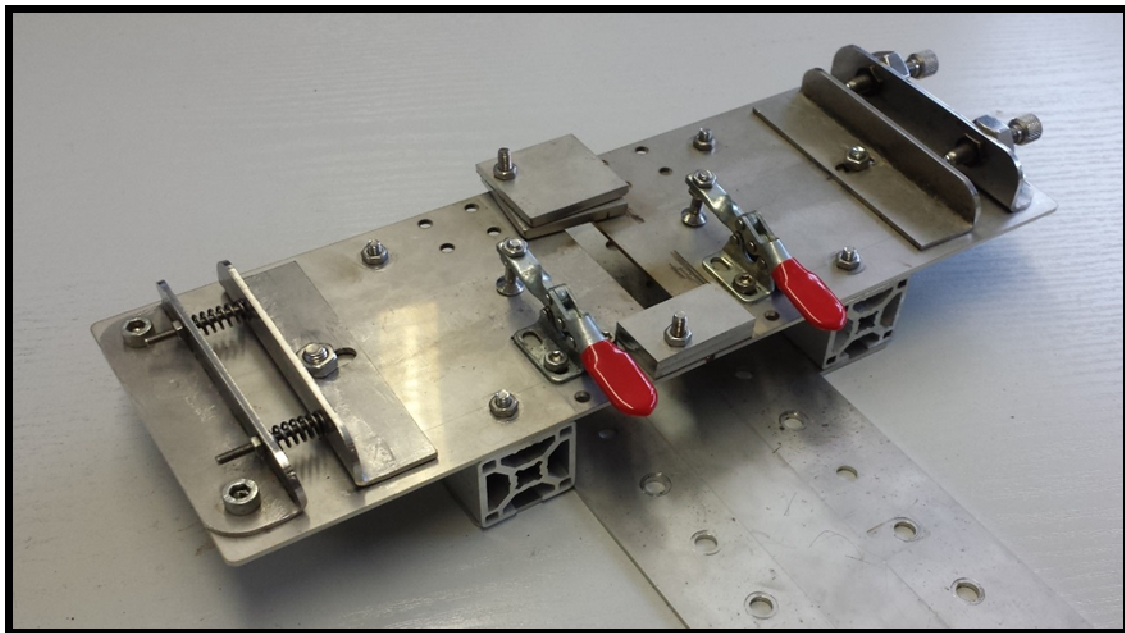




**Abb. 3-5: Spannvorrichtung 1 Schliffproben**

*Zugproben:*

Der Spannprozess unterscheidet sich zu dem der Schliffproben nur geringfügig. Die Bleche werden dabei horizontal statt vertikal eingelegt, da nur an den kurzen Seiten der Probenbleche geschweißt wird. Um dies zu realisieren, ist die Entfernung der Spannelemente zueinander erheblich größer als bei der ersten Spannvorrichtung. Damit dennoch ein festes Spannen ohne Verrutschen der Proben während des Schweißvorgangs gewährleistet werden kann, wird nicht nur ein Vertikalschnellspanner genutzt, sondern gleich zwei. Dafür entfällt die zusätzliche Fixierung durch die Spannklemme.



**Abb. 3-6: Spannvorrichtung 2 Zugproben**

### 3.1.4 Achssystem

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Laserstrahl und Werkstück wird über ein Linearachssystem des Herstellers AEROTECH realisiert. Dies zeichnet sich durch eine hohe Positionierungsgenauigkeit aus. Aufgrund der Achsenträgheit gilt es jedoch, eine Beschleunigungs- und Abbremsstrecke zu beachten. Diese ist je nach eingestellter Geschwindigkeit unterschiedlich lang. Dadurch steht bei Spitzengeschwindigkeiten nur eine begrenzte Nutzstrecke zur Verfügung [12]. Messungen ergaben, dass eine konstante Geschwindigkeit von bis zu 90 m/min über eine Nutzstrecke von 76,5 mm erreicht werden kann. Bei höheren Geschwindigkeiten fällt die Nutzstrecke zu gering aus, um noch erfolgreiche Schweißungen realisieren zu können. Das Verhältnis von Geschwindigkeit zu Nutzstrecke veranschaulicht das folgende Diagramm.

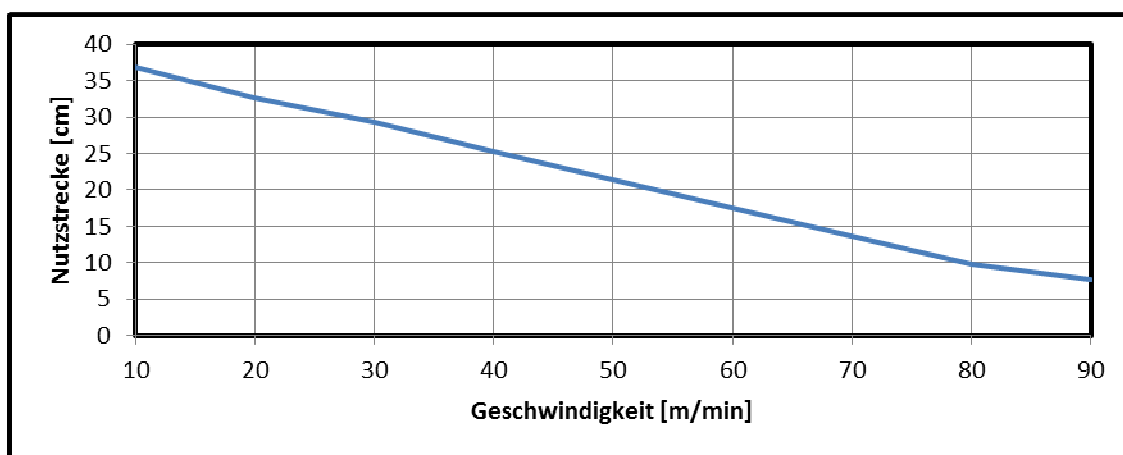


Abb. 3-7: Verhältnis von Geschwindigkeit zu Nutzstrecke bei Linearachse AEROTECH

Über das Beschleunigungs- und Abbremsverhalten gibt Abb. 3-8 Aufschluss.

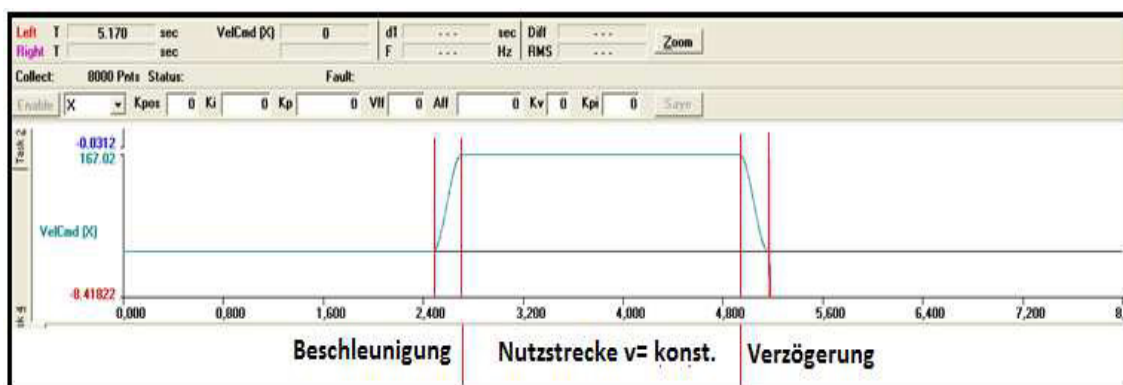


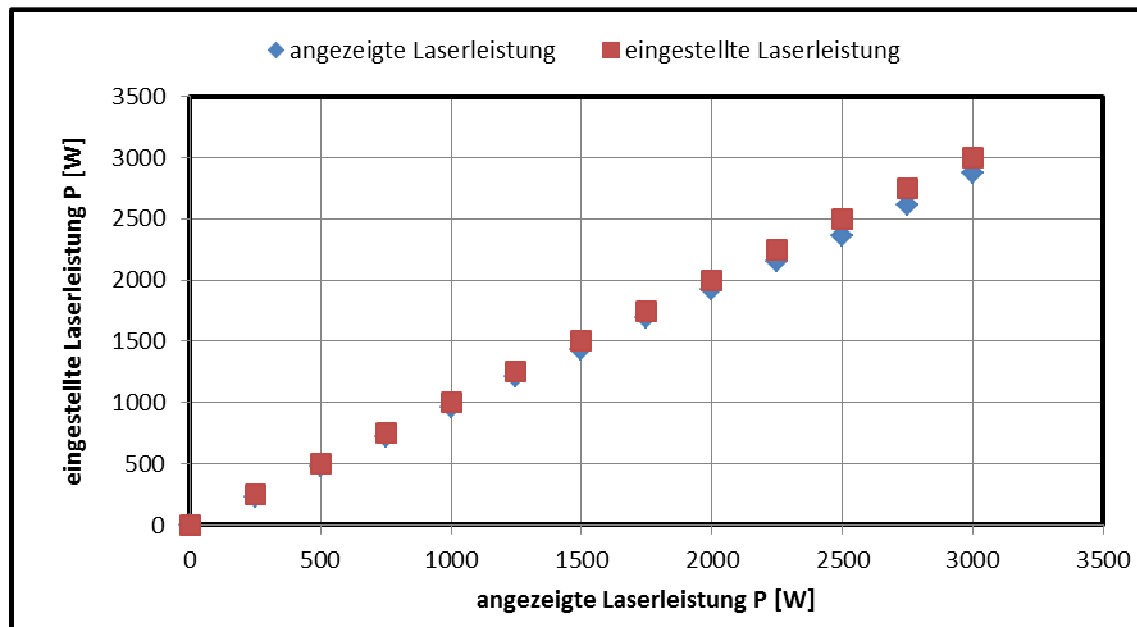
Abb. 3-8: Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der Linearachse AEROTECH

Erkennbar ist dabei, dass Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecke gleich lang sind. Diese steigen mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit linear an. Im gleichen Zug sinkt die Nutzstrecke linear ab, wodurch die maximale Geschwindigkeit begrenzt wird (vgl. Anlage A).

## 3.2 Strahlcharakterisierung

### 3.2.1 Leistungsmessung

Die Angaben vom Laserhersteller beziehen sich auf Messungen direkt am Ausgang des Lasers. Zwischen Laser und Bearbeitungsstelle befinden sich jedoch mehrere Komponenten zur Strahlführung und -formung, die einen Teil der Laserstrahlung absorbieren und die Strahlqualität verändern können. Um die genaue applizierte Laserleistung auf der Probenoberfläche zu bestimmen, wurde eine Leistungsmessung unter Berücksichtigung aller Verluste durch Strahlführung und -formung durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Leistungsstufen eingestellt und die tatsächlich ankommende Leistung nach passieren der optischen Komponenten ermittelt. Diese Werte sind dem Diagramm aus Abb. 3-9 zu entnehmen.



**Abb. 3-9: Resultierende mittlere Laserleistung nach passieren der Optikkomponenten bei verschiedenen Leistungsvorgaben**

Die Achsenbeschriftung „eingestellte Laserleistung“ bezieht sich auf den in der Software vorgegebenen Wert. Die „gemessene Laserleistung“ wurde über ein internes Leistungsmessgerät ausgegeben und repräsentiert die real verfügbare Leistung, nach passieren des Laserstrahls aller optischen Komponenten zur Strahlführung und –formung, welche auf der Probenoberfläche wirkt. Die Messung hat ergeben, dass sich die real verfügbare maximale Laserleistung auf 2870,9 W beläuft, das entspricht einem Verlust von nur 4,303 % gegenüber dem eingestellten Wert von 3000 W.



### 3.2.2 Strahlvermessung

Zur Quantifizierung der räumlichen Laserstrahleigenschaften wurde eine Strahlvermessung durchgeführt. Die Ergebnisse der Vermessung sind in Tabelle 3-3 zusammengefasst:

Formelzeichen	Bezeichnung	Wert	Maßeinheit
$d_{0,86}$	Fokusbereich	53	$\mu\text{m}$
$A_{d0,86}$	Strahlflussquerschnitt	2206	$\mu\text{m}^2$
$M^2$	Beugungszahl	1,16	-
$Z_R$	Rayleighlänge	1,671	mm

Tab. 3-3: Ergebnisse Strahlvermessung

Der Fokusbereich (Strahldurchmesser bei stärkster Fokussierung – auch Strahltaile genannt) beträgt 53  $\mu\text{m}$ . Dessen Formelzeichen wird mit dem Index 0,86 beaufschlagt, da die Intensitätsverteilung des Laserstrahls gaußförmig ausgeprägt ist. Dabei weisen die „0,86“ daraufhin, dass 86 % der applizierten Intensität innerhalb des Strahlflussquerschnittes eingebracht wird [13]. Der Strahlflussquerschnitt errechnet sich dabei mit der nachfolgenden Gleichung:

$$A_{d0,86} = \left(\frac{d_{0,86}}{2}\right)^2 * \pi$$

mit  $A_{d0,86}$  ... Strahlflussquerschnitt  
 $d_{0,86}$  ... Fokusbereich

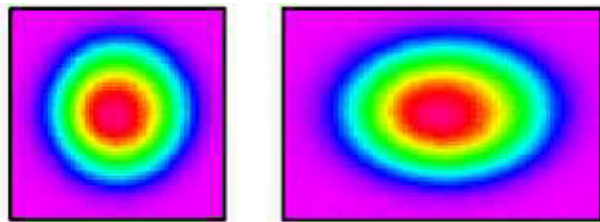
Die Rayleighlänge gibt an, bei welchem Abstand sich die Querschnittsfläche des Laserspots entlang der optischen Laserstrahlachse verdoppelt. Dabei ermöglicht es die nachfolgende Formel, den Fokusbereich bei jedem Abstand zur Strahltaile zu berechnen [13].

$$d_{0,86}(z) = d_{0,86} * \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda * M^2 * z}{\pi * d_{0,86}^2}\right)^2}$$

mit  $d_{0,86}(z)$  ... Spotdurchmesser bei Abstand zur Fokusebene  
 $d_{0,86}$  ... Fokusbereich  
 $\lambda$  ... Laserwellenlänge  
 $M^2$  ... Beugungsmaßzahl  
 $z$  ... Abstand zur Fokusebene

### Strahlfleckquerschnitt/ - durchmesser:

In weiteren Untersuchungen wird mittels Schrägstellung des Schweißkopfes der Lasereinstrahlwinkel  $\alpha$  auf das Werkstück verändert. Dabei verändert sich der wirkende, kreisförmige zu einem elliptischen Strahlquerschnitt hin. Es wird angenommen, dass das Strahlprofil je nach Einfallswinkel lediglich entlang der Längsachse der Ellipse verzerrt wird, was keinen Einfluss auf die Schweißnahtbreite haben sollte.



Links: senkrechte Einstrahlung; Rechts: 45° Einstrahlung

**Abb. 3-10: Strahlfleck des Laserspots bei Strahlvermessung**

Bei diesem Vorgang vergrößert sich der resultierende Strahlfleckquerschnitt mit zunehmendem Lasereinstrahlwinkel  $\alpha$  in Schweißrichtung. In Abbildung 3-10 und Tabelle 3-4 wird dieser Zusammenhang veranschaulicht [12].

Lasereinstrahlwinkel	Resultierender Strahlfleckquerschnitt
0°	2206 $\mu\text{m}^2$
25°	2434 $\mu\text{m}^2$
45°	3120 $\mu\text{m}^2$

**Tab. 3-4: Zusammenhang zwischen Lasereinstrahlwinkel und Strahlfleckquerschnitt**

### 3.2.3 Strahlengang und Schweißkopfvorrichtung

In diesem Abschnitt wird die konstruierte Baugruppe, wie sie für die Schweißversuche am 3 KW Faserlaser zum Einsatz kommen soll, näher beschrieben. Der Grundaufbau besteht aus drei Würfeln mit runden Öffnungen zu je vier Seiten. An allen relevanten Verbindungsflächen wurden Dichtungsringe eingesetzt. Als Halterung des Objektivs dient eine Aluminiumbuchse, die an eine Adapterplatte geschraubt ist. Mittels eines Messingrings hält das Objektiv in der Buchse und kann getauscht werden, ohne die Adapterplatte entfernen zu müssen. Die Regelkarte befindet sich in einem Kunststoffgehäuse und ist an einer Platte über dem Scanner verschraubt. An der Regelkarte ist ein  $50\ \Omega$  Widerstand verbaut. Sie wird extern über einen Frequenzgenerator angesteuert. Zur Kühlung wird Wärmeleitpaste verwendet. Um zukünftig auch andere Spiegel oder Scanner einsetzen zu können, ist die Positionierschiene mit Langlöchern als Befestigungspunkte versehen. So kann die ganze Einheit je nach Spiegeldicke verschoben werden. Die Haltebleche geben dabei die  $45^\circ$  Führung an. Die Vorrichtung wird über die Drehadapterplatte mit der Laseranlage verbunden. Dadurch ist es möglich, die Vorrichtung schräg zu stellen. Der maximale Drehwinkel beträgt dabei ca.  $50^\circ$ .

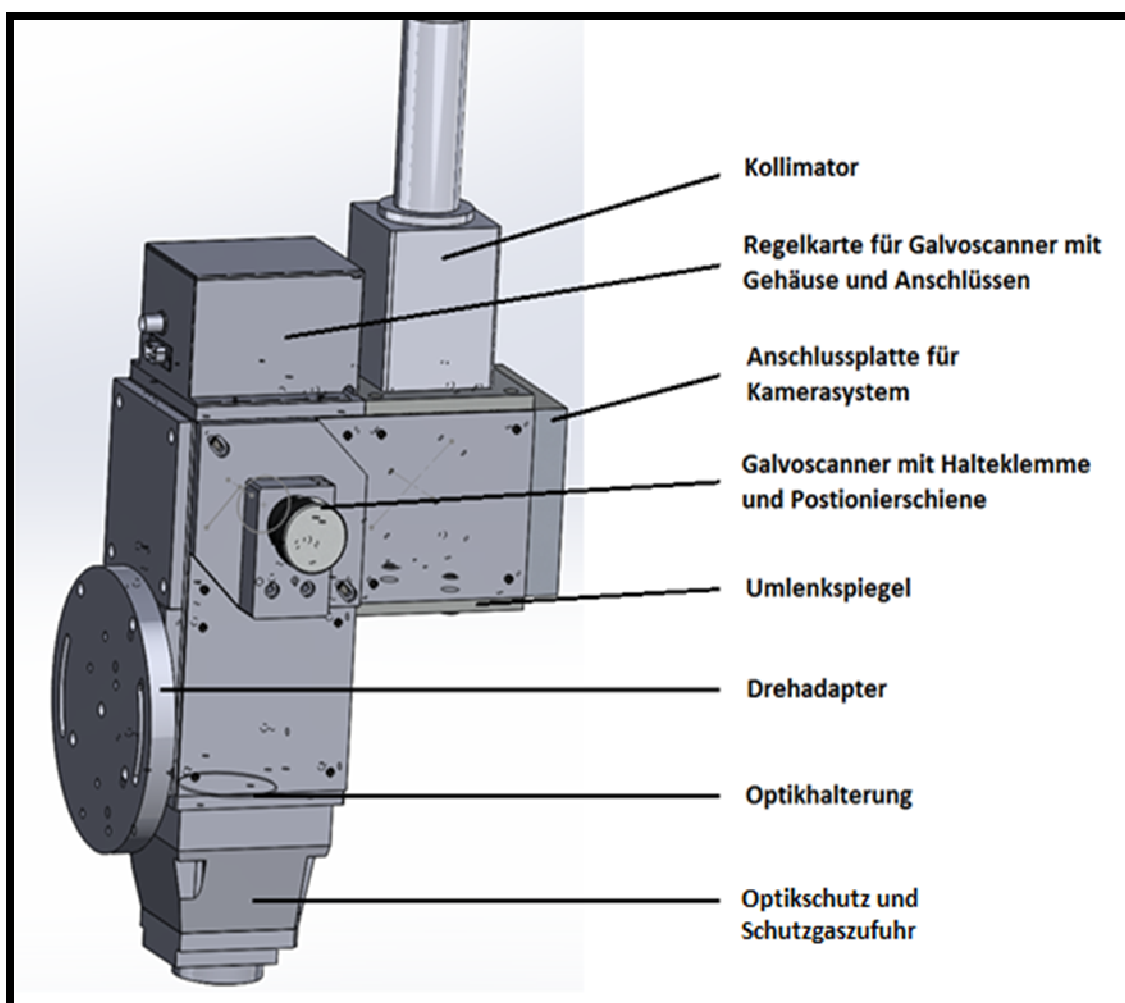


Abb. 3-11: Darstellung der Bestandteile des Schweißkopfs

In dieser Grafik mit abgebildet ist das Kamerasystem, mit dessen Hilfe bei den Schweißversuchen die Proben ausgerichtet werden. Je nach Drehwinkel des Schweißkopfes ist der Anschluss des Kollimationsmoduls (im Folgenden Kollimator genannt) und des Umlenkspiegels flexibel gestaltet, sodass eine bauraumbedingte Modifikation kein Problem darstellt. Das Kamerasystem bleibt davon unbeeinflusst.

Die Abbildung 3-12 veranschaulicht den Strahlengang. Die Laserstrahlung gelangt dabei vom Laser über die optische Faser zum Kollimator und wird dort geformt und gebündelt. Über einen Umlenkspiegel, welcher den Laserstrahl um 90° horizontal ablenkt, trifft dieser auf den Spiegel des Galvometerscanners und wird von dort vertikal mit einer optionalen Pendel- oder Wobbelbewegung abgelenkt. Als nächstes durchdringt der Strahl das Objektiv, um dort entsprechend fokussiert zu werden. Abschließend wird der nun fokussierte Laserstrahl in das Optikschutzmodul geleitet, in welchem Schutzglas und die optionale Schutzgaszuführung integriert sind, ehe er letztendlich auf der Oberfläche des Werkstücks auftrifft. Mit diesem Strahlführungssystem kann der Weg von der Laserstrahlungsquelle zur Schweißprobenoberfläche schnell, verlustarm und flexibel überbrückt werden.

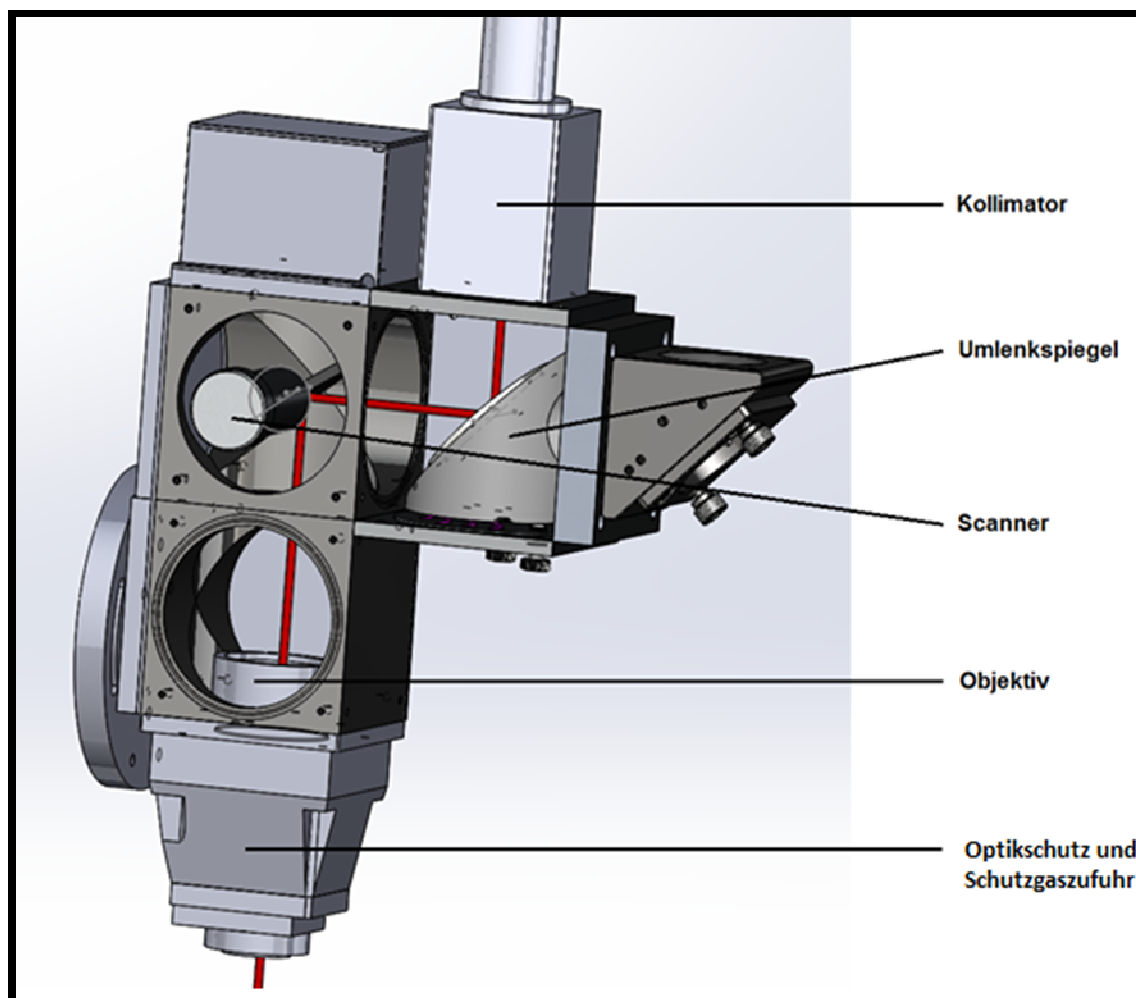


Abb. 3-12: Darstellung des Strahlengangs

### 3.2.4 Prozessführung

Die Prozessführung für die späteren experimentellen Untersuchungen ist stechend im Sinne der Lasertechnik. Der Laserstrahl trifft dabei je nach eingestelltem Lasereinstrahlwinkel  $\alpha$  auf dem Werkstück auf, dieses vollzieht indes eine Relativbewegung in entgegengesetzter Richtung zur Lasereinstrahlung. Die Abbildung 3-13 veranschaulicht die Prozessführung und gibt Aufschluss über die genutzten Einstellungen zum Lasereinstrahlwinkel.

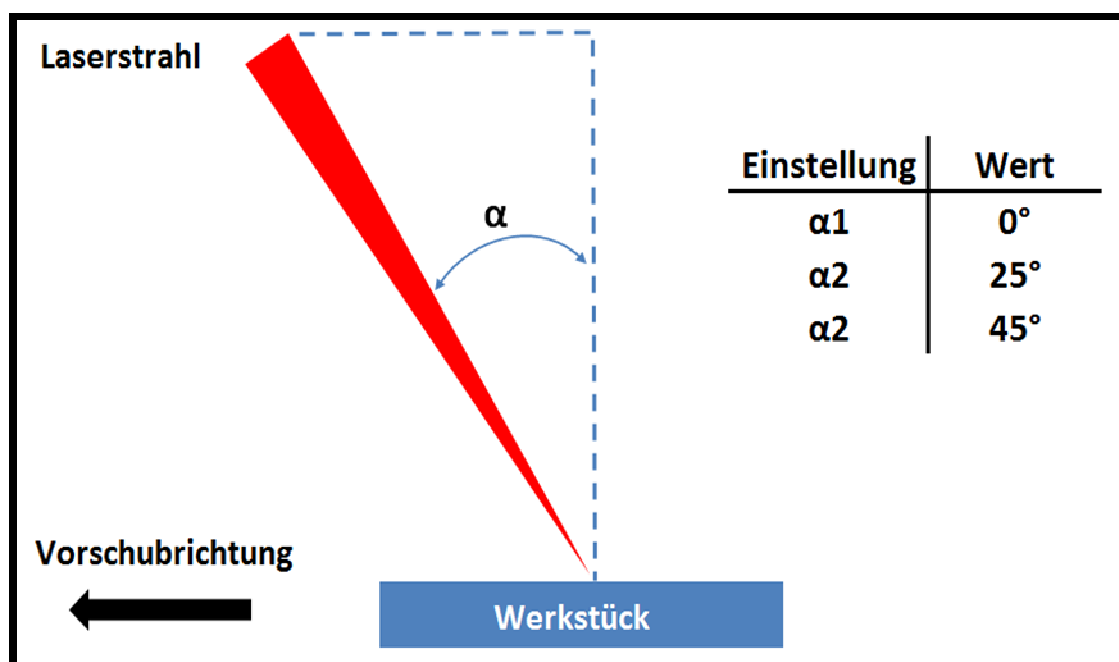


Abb. 3-13: Darstellung der Prozessführung

### 3.2.5 Schweißgeschwindigkeit

Die Ermittlung der maximalen Schweißgeschwindigkeit stellt einem Untersuchungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Diese ist direkt mit der Materialstärke gekoppelt und wird durch auftretende Humping- und Spiking- Effekte eingegrenzt. Die Variation der Schweißgeschwindigkeit wird in fünf Stufen, entsprechend Tabelle 3-5 vorgenommen. Ein Grund dafür ist der degressive Verlauf der Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit.

Materialstärke	Geschwindigkeitsvariation
1,0 mm	50 – 60 – 70 – 80 – 90 m/min
1,5 mm	30 – 40 – 50 – 60 – 70 m/min
2,0 mm	10 – 20 – 30 – 40 – 50 m/min
2,5 mm	5 – 10 – 20 – 30 – 40 m/min

Tab. 3-5: Gewählte Schweißgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Materialdicke

### 3.3 Probencharakterisierung

Für die experimentellen Schweißversuche wurden zwei unterschiedliche Materialien in verschiedenen Blechstärken verwendet. Im Folgenden wird auf Bezeichnung, Verwendung, chemische Zusammensetzung, mechanische Eigenschaften der Stähle näher Bezug genommen.

#### 3.3.1 X5CrNi18-10

Beim X5CrNi18-10 (1.4301) handelt es sich um einen rost- und säurebeständigen Edelstahl. Der Stahl verfügt im Anlieferungszustand über ein voll-austenitisches Grundgefüge.

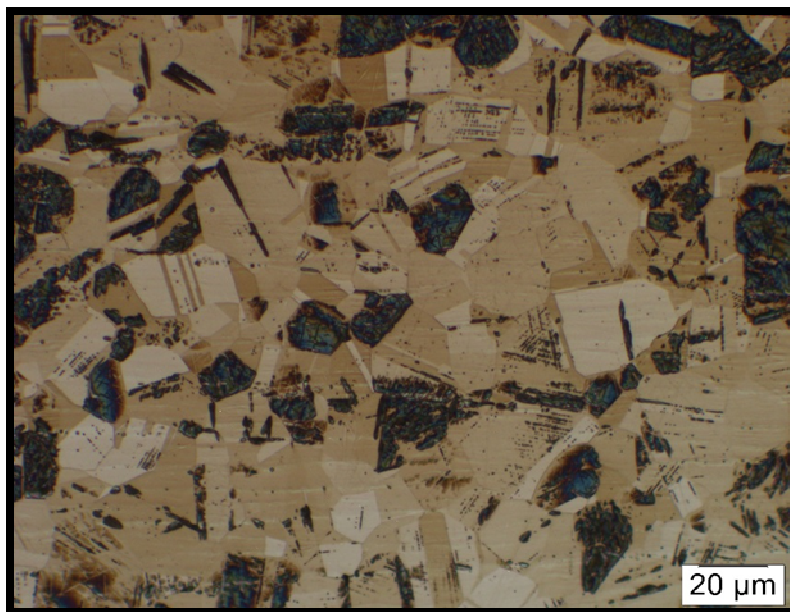
Formelzeichen	Bezeichnung	Wert	Maßeinheit
$R_{p0,2min}$	Dehngrenze	230	N/mm <sup>2</sup>
$R_m$	Zugfestigkeit	540-750	N/mm <sup>2</sup>
A	Bruchdehnung	45	%
$\rho$	Dichte	7,9	g/cm <sup>3</sup>

Tab. 3-6: Eigenschaften X5CrNi18-10

Nach Herstellerangaben sei der 1.4301 für das Laserstrahlschweißen sehr gut geeignet. Bei Schweißfugenbreiten kleiner 0,3 mm bzw. 0,1 mm Erzeugnisdicke kann auf die Verwendung von Schweißzusatzstoffen verzichtet werden. Bei größeren Fugenbreiten kann artgleicher Zusatzwerkstoff verwendet werden. Eine Heißrissgefährdung der Schweißnaht ist bei geeigneter Prozessführung nicht gegeben.

Aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit wird dieses Material überwiegend in Bereichen verwendet, in denen mit erhöhter Feuchtigkeit zu rechnen ist. Beispiele dafür sind u.a. die Nahrungsmittelindustrie, der Behälterbau, die Heizungs- und Klimatechnik sowie der Rohrleitungsbau. Weitere Anwendung findet der Werkstoff im Maschinen- und Anlagenbau, im Stahlbau und in der Medizintechnik [14].

Die nachfolgende Grafik zeigt das Gefüge des X5CrNi18-10. Das Grundgefüge dieses hochlegierten Stahls bilden Austenitkörner, in den sich Martensit eingelagert hat. Dieser hat sich durch die Blechherstellung (walzen etc.) gebildet. Des Weiteren sind Gleitbänder zu erkennen, welche sich netzartig in Verformungsrichtung ausgebildet haben. Insgesamt liegt eine homogene Kristallisation vor.



**Abb. 3-14: Gefüge X5CrNi18-10**

Über die genaue chemische Zusammensetzung des Werkstoffes gibt die nachfolgende Tabelle Aufschluss. Die darin hinterlegten Werte wurden mit einer Emissionsspektroskopie nach DIN 51009 [15] ermittelt und werden mit den Herstellerangaben verglichen.

Element	Kennwert ermittelt [%]	Herstellerangaben [%]
C	0,045	$\leq 0,07$
Mn	1,11	$\leq 2,00$
Si	0,3	$\leq 1,00$
Ni	8,16	8,0 – 10,5
Cr	18,41	17,0 – 19,5
S	0,003	$\leq 0,015$
P	0,079	$\leq 0,045$
Fe	70,87	Rest

**Tab. 3-7: Chemische Zusammensetzung X5CrNi18-10**

Aus der Tabelle geht hervor, dass die ermittelten Werte die vorgegebenen Grenzwerte durch den Werkstoffhersteller nicht überschreiten. Der Phosphor ist leicht erhöht, was jedoch damit zusammenhängt, dass das Messgerät bei der Ermittlung des Phosphorgehaltes nachgewiesen fehlerhaft misst, sodass dieser erhöhte Wert nicht überbewertet werden sollte. Um eine etwaige Heißrissgefährdung von vornherein ausschließen zu können, wird mittels Scheffler- Diagramm der Bereich ermittelt, indem der Werkstoff entsprechend seiner Gefügebestandteile nach der chemischen Analyse liegt. Siehe dazu die Anlage B.

### 3.3.2 DC04

Der DC04 (1.0338) oder auch St14 (FeP04) ist ein unlegierter Qualitätsstahl. Unlegierte Stähle sind sehr preisgünstige Werkstoffe für einfache Teile ohne Ansprüche an Korrosionsbeständigkeit und mechanische Belastungen. Je nach Einsatzgebiet sind die Stähle DC01 bis DC05 in unterschiedlichen Festigkeitsklassen von geglähten bis zu hartgewalzten Ausführungen verfügbar. Typische Anwendungsbereiche ergeben sich für die Automobilindustrie, das Bauwesen und die Herstellung von Profilen und Rohren. Der niedrige Mangan- und Kohlenstoffgehalt des DC04 wirkt einer zu hohen Aufhärtung in der Wärmeeinflusszone (WEZ) entgegen. Deshalb besitzt er eine sehr gute Schweißbeignung auch in Verbindung mit anderen, höherfesten und unlegierten Stählen. Als Verbindungsverfahren eignen sich im Allgemeinen alle gängigen thermischen und mechanischen Fügeverfahren sowie die Klebetechnik. Der DC04 eignet sich besonders für das Schweißen nach gebräuchlichen industriellen Verfahren, wie beispielsweise dem Laserstrahlschweißen. Lediglich beim Widerstandspunktschweißen kann es in Abhängigkeit von der chemischen Analyse der Stähle zu leichten Verschiebungen des optimalen Schweißbereiches kommen [16].

Formelzeichen	Bezeichnung	Wert	Maßeinheit
$R_{p0,2min}$	Dehngrenze	140 - 210	N/mm <sup>2</sup>
$R_m$	Zugfestigkeit	270- 350	N/mm <sup>2</sup>
A	Bruchdehnung	38	%
$\rho$	Dichte	7,85	g/dm <sup>3</sup>

Tab. 3-8: Eigenschaften DC04

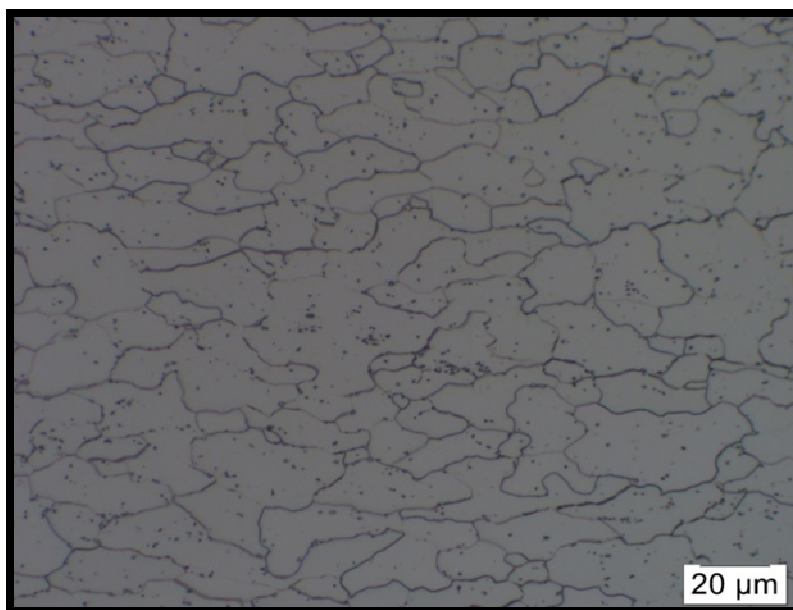
Tabelle 3-9 zeigt die genaue chemische Zusammensetzung. Die darin hinterlegten Werte wurden mit einer Emissionsspektroskopie nach DIN 51009 [15] ermittelt und werden mit den Maximalwertender Herstellerangaben verglichen.

Element	Kennwert ermittelt [%]	Herstellerangaben [%]
C	0,04	≤ 0,08
Mn	0,21	≤ 0,4
P	0,01	≤ 0,03
S	0,01	≤ 0,03
Fe	99,55	Rest

Tab. 3-9: Chemische Zusammensetzung DC04

Wie in Abbildung 3-15 zu erkennen ist, bildet sich das Grundgefüge aus Ferritkörner als Hauptbestandteil mit kleinen kugelförmigen Zementitabscheidungen. Aufgrund des sehr geringen Kohlenstoffgehalts des Werkstoffs kam es im Grundgefüge nicht zu einer Bildung von Perlit.





**Abb. 3-15: Gefüge DC04**

### 3.3.3 Probengeometrie und –handling

Für die Versuche mit dem X5CrNi18-10 wurden die Blechstärken 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm und 2,5 mm untersucht. Der DC04 stand in den Blechstärken 1,5 mm und 2,0 mm zur Verfügung. Die Probengeometrien der beiden Werkstoffe sind je nach Art der Schweißversuche identisch. So sind die Probenabmaße der Stumpfstoßschweißungen für Schliffe 25 x 80 mm und die Probenabmaße der Stumpfstoßschweißungen für Zugversuche 85 x 20 mm. Die Tabelle 3-10 veranschaulicht diese Informationen.

Werkstoff	Art der Schweißung	Probengeometrie
X5CrNi18-10	Stumpfstoßschweißung für Makroschliff	25 x 80 mm
	Stumpfstoßschweißung für Zugversuch	85 x 20 mm
DC04	Stumpfstoßschweißung für Makroschliff	30 x 80 mm
	Stumpfstoßschweißung für Zugversuch	85 x 20 mm

**Tab. 3-10: Probengeometrie und – Verwendung**

Für ein erfolgreiches Verbindungsschweißen im Stumpfstoß war es bisher notwendig, sehr präzise Ausrichtarbeiten wie auch geschliffene Körperkanten vorzunehmen. Um dies auf ein Minimum zu begrenzen, soll im Experiment das Schweißen geometrisch bestimmter Konturformen sowohl auf die Fähigkeit zur Spaltüberbrückung wie auch den Ausgleich von Kantenversatz und Positionierabweichungen untersucht werden. Aus diesem Grund wurden für die Schweißversuche nur Probenbleche mit lasergeschnittenen Körperkanten verwendet. Somit weisen die Körperkanten eine durchschnittliche Oberflächenrauheit von 30 bis 50 µm auf. Bei jedem Probenpaar wurden Spaltvermessungen (Digitalmikroskop) durchgeführt, um somit eine gleichmäßige Spaltbreite zwischen 60 und 80 µm gewährleisten zu können.

### 3.4 Allgemeine Versuchsparameter

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der allgemeinen Parameter bzw. Einstellungen. Diese blieben, sofern sie bzw. ihre Einflüsse auf den Schweißprozess nicht selbst untersucht wurden, für alle Versuchsreihen im definierten Rahmen.

Parameter	Wert
Versuchsaufbau	Festkopfoptik mit Galvometerscanner
Schweißoptik	F250
Brennweite	230 mm
Laserleistung	2870,9 W
Strahlqualität	1,16
Fokusedurchmesser	53 $\mu\text{m}$
Strahlquerschnitt auf der Probe	2206 $\mu\text{m}^2$
Einstrahlwinkel	0° ; 25° ; 45°
Prozessführung	stechend
Schweißart	Stumpfstoß
Schweißgeschwindigkeit	5 bis 90 m/min
Scannerfrequenz	7,5 kHz
Strahlauslenkung	125 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$
Signal	Sinus
Crossdüse	4 N bis 8 bar Blasdruck bei 30 bis 60° Anstellwinkel

**Tab. 3-11: Zusammenfassung der Versuchsparameter**

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Untersuchungen zu überlagerter Bahnbewegung

#### 4.1.1 Spaltüberbrückbarkeit

Bedingt durch die sehr lokal begrenzte Wirkzone des Laserstrahls und die damit einhergehende geringe Spaltüberbrückbarkeit konnte das Laserschweißen bislang oftmals nur unter hohem Nahtvorbereitungsaufwand und bei Einhaltung von sehr eng bemessenen Toleranzgrenzen in den Fügezonen genutzt werden. Die Verwendung eines hochfokussierten Laserstrahls, welcher sich in einer gependelten Sinus- bzw. Rechteckbahn bewegt, macht es nun möglich, einen Fügespalt von bis zu 100  $\mu\text{m}$  Breite wirksam zu überbrücken.

Dieser Effekt ist im Laserschweißprozess sehr nützlich, denn nicht selten entstehen Spalten an den Fügezonen infolge von Maßabweichungen der Bauteile, Positionierungstoleranzen und thermisch bedingter Verformung beim Schweißen. Diese auftretenden Spalten sind unerwünscht und sollten so klein wie möglich gehalten werden. Der sog. technische Nullspalt stellt dabei den Idealfall dar. Da das in der Praxis oftmals nur schwer zu realisieren und meist mit zu hohem Aufwand verbunden ist, wird Zusatzwerkstoff für die Lösung des Problems zugeführt. Jedoch treten mit der Einbindung des Zusatzwerkstoffes in den Schweißprozess neue Probleme auf. Die handelsübliche Vorgehensweise ist, den Zusatzwerkstoff drahtförmig über einen eigenen Vorschub zuzuführen. Häufig ist eine Anpassung des Laserspots notwendig. Um die benötigte Erhöhung des Spotdurchmessers zu erreichen, kann beispielsweise eine Defokussierung erfolgen. Allerdings steht diese Maßnahme in direktem Interessenkonflikt gegenüber den Vorteilen eines Faserlasers mit hochbrillanter Laserstrahlung. Die Pendelung des Laserstrahls stellt einen alternativen Ansatz zur Spaltüberbrückung auch bei hochintensiver Strahlung dar [17].

#### 4.1.2 Erläuterungen zur Konturform

Das Schweißen erfolgt, wie in Abbildung 4-1 und 4-2 dargestellt, mittels einer sinusförmigen oder auch pendelnden Nahterzeugung. Der Galvanometerscanner hat hierbei lediglich die Auslenkbewegung in Y- Richtung durchzuführen, da die lineare Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  durch die Linearachse erzeugt wird, sodass nur Bahngeschwindigkeit  $v_B$ , welche sich aus der Frequenz ergibt, von Bedeutung ist. Eine vollständige Pendelbewegung besteht aus einer Strahlauslenkung in Y- Richtung sowie der Umekehrbewegung in Ausgangslage [13].

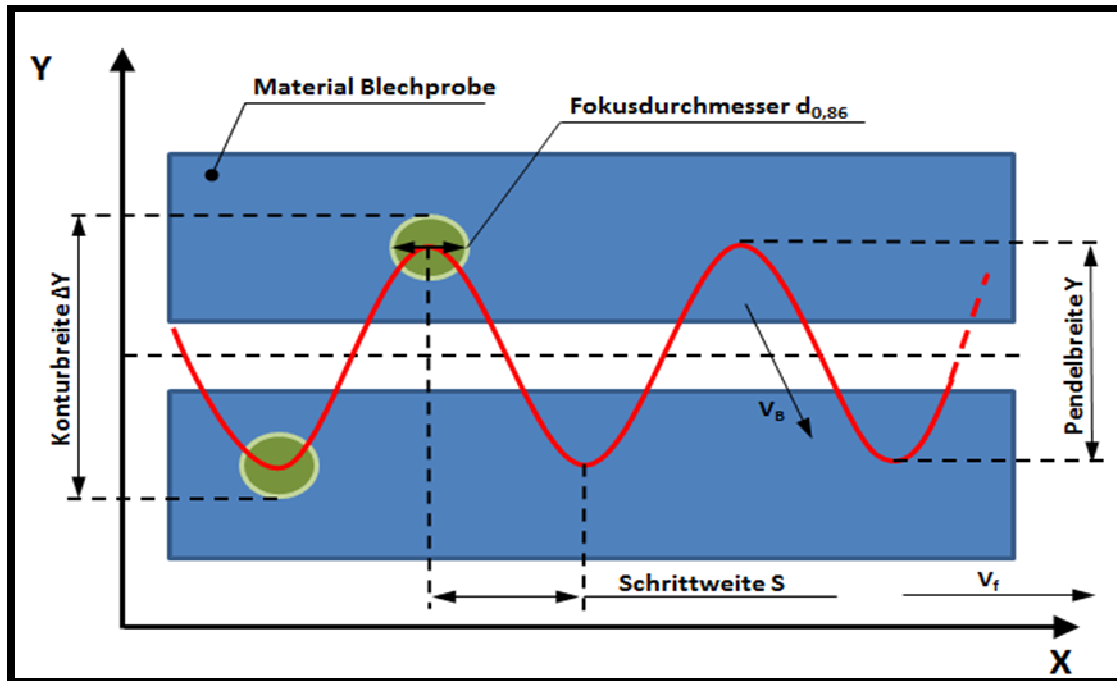


Abb. 4-1: Beschreibung der Bahnbewegung



Blindschweißung auf X5CrNi18-10 Blechprobe

Abb. 4-2: Strahlpemmelverlauf Sinus

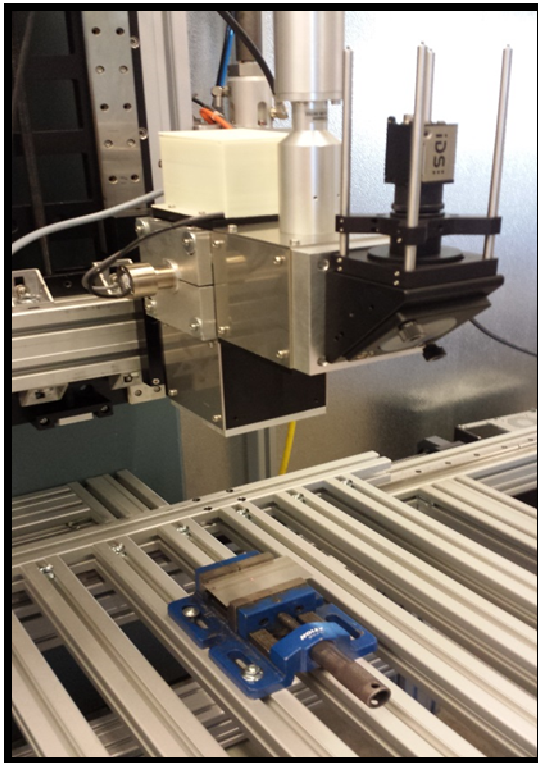
### 4.1.3 Ermittlung der optimalen Pendelfrequenz

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden mit dem verwendeten Galvometerscanner Versuche zur Ermittlung der optimalen Pendelfrequenz durchgeführt. Ziel dabei war es, die Grenzen der Massenträgheit des Systems zu ermitteln, um dadurch die maximal mögliche Pendelfrequenz zu bestimmen. Die Theorie dahinter ist, dass mit steigender Frequenz, die Periodendauer  $T$  abnimmt, was zur Folge hat, dass die Schweißnaht dichter gependelt wird. Dieser Umstand soll zu einer besseren Spaltüberbrückbarkeit führen.

Zur Bestimmung der Amplitude müssen die Spannungs- Frequenz- Äquivalente experimentell ermittelt werden. Dazu wurden Blindschweißungen auf X5CrNi18-10 Blech-

proben durchgeführt. Der entstehende Spalt zwischen den zu verschweißenden Blechstreifen liegt im Bereich von 60 bis 80  $\mu\text{m}$ . Kleinere Spaltbreiten konnten nicht realisiert werden, da ausschließlich lasergeschnittene Körperkanten ohne Nachbehandlung verwendet wurden. Der Verzicht auf weitere Arbeitsgänge wie beispielsweise Schleifen ist im späteren Anwendungsfall in der industriellen Produktion von Vorteil.

#### Versuchsaufbau und -durchführung:

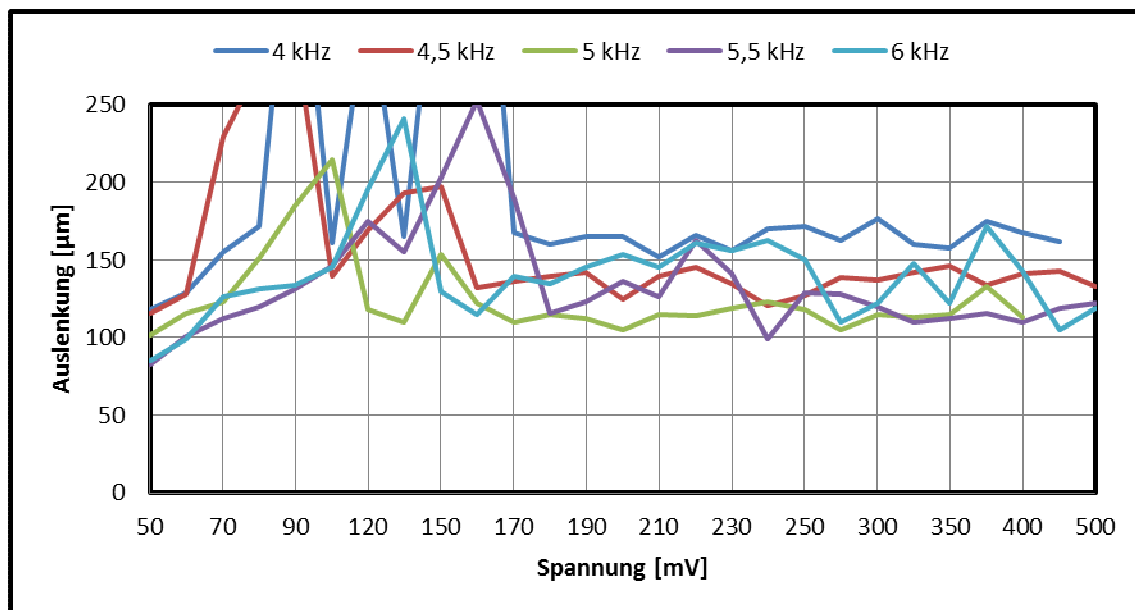


Der Versuchsaufbau unterscheidet sich von dem der Stumpfstoßschweißversuche nur geringfügig. Die Vorschubbewegung des Werkstücks wird dabei ebenfalls mittels einer Linearachse generiert. Lediglich auf das Optikschutzmodul mit integrierter Schutzgaszuführung (vgl. Abb. 3-11) wurde verzichtet. Der Einstrahlungswinkel des Laserstrahls ist senkrecht zur Probenoberfläche ausgerichtet, um ein Verzerren des entstehenden Pendelverlaufes zu vermeiden. Als Laserquelle dient ein gepulster YLP- 1/100/20 Singlemode Ytterbium-Faserlaser der Firma IPG mit einer Wellenlänge von 1070 nm und einer Pulsleistung von 20 W. Die Strahlqualität  $M_2$  beträgt 1,6. Die einstellbare Pulsfrequenz liegt zwischen 10 und 500 kHz.

**Abb. 4-3: Versuchsaufbau Strahlpendelung**

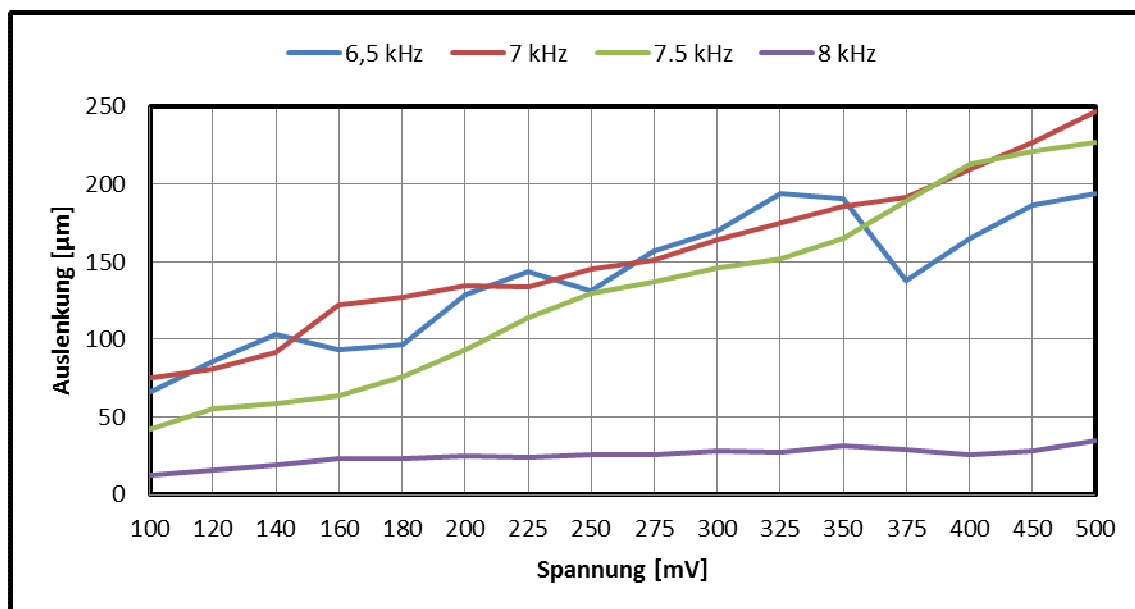
Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden verschiedene Frequenzen innerhalb festgelegter Spannungsgrenzen generiert. Die Untersuchungen reichen von 0,2 bis 8 kHz, um verlässliche Aussagen über das Verhalten des Galvometerscanners bei jeder Frequenz treffen zu können. Dadurch soll im Anschluss der Frequenz-/ Spannungsbereich ausgewählt werden können, welcher eine festgelegte und reproduzierbare Strahlauslenkung von  $125 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$  (inklusive 53  $\mu\text{m}$  Fokusedurchmesser) erzeugt.

Die Auswertung mittels Keyence Digitalmikroskop der Blindnähte im Frequenzbereich unter 4 kHz hat ergeben, dass allesamt eine ungenügende Überlappung aufweisen. Dies resultiert aus einer zu hohen Schrittweite  $S$ , sodass eine dichtgependelte Naht nicht zustande kommen kann. Folglich ist auch der Energieeintrag im Bereich des Blechspalts zu gering. Zudem kann es passieren, dass nur punktuell verschweißt wird, da die Maxima der Pendelschwingung des Laserstrahls zu weit auseinandergezogen sind und sich so kein einheitliches Schmelzbad bilden kann. Dieser Frequenzbereich kann demnach für weitere Untersuchungen ausgeschlossen werden.



**Abb. 4-4: Amplitude bei Scannerfrequenz von 4 kHz bis 6 kHz**

Im Bereich zwischen 4 und 6 kHz treten unerwartet im Spannungsintervall von 50 bis 180 mV Ausreißer auf. Die Ursache für dieses Verhalten wird Eigenresonanzen des Galvanometerscanners in diesem Frequenz-/ Spannungsbereich zugeschrieben. Bei höherer Spannung beruhigt sich das System wieder weitgehend, jedoch schwankt die Auslenkung um bis zu 70  $\mu\text{m}$ . Wenngleich die Nähte deutlich dichter gependelt sind, ist eine derartige Schwankung im Schweißprozess nicht tolerierbar, sodass noch höhere Frequenzen untersucht werden müssen.



**Abb. 4-5: Amplitude bei Scannerfrequenz von 6,5 kHz bis 8 kHz**



Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Auslenkung des Laserstrahls im Frequenzbereich von 6,5 bis 7,5 kHz linear mit zunehmender Spannung ansteigt. Ein Einbruch der Strahlauslenkung ist erst ab 8 kHz zu beobachten. Bei dieser Frequenz ist die Grenze der Massenträgheit des Galvanometersystems erreicht. Der Verlauf des Graphen bei 7,5 kHz weist den linearsten Verlauf auf. Dadurch ist gewährleistet, dass im Schweißversuch die eingestellte Spannung auch zur gewünschten Auslenkung ( $125 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ ) führt. Diese kann bei einer Spannung von 250 mV realisiert werden.

Zudem ist aufgrund der maximal möglichen Frequenz eine hinreichend dicht gependelte Schweißnaht gewährleistet, wodurch die Schweißnahtfestigkeit gesteigert werden soll. Die folgenden Abbildungen machen die Bedeutung der Pendeldichte sichtbar. Verglichen werden die Blindschweißungen bei 5 kHz und bei 7,5 kHz.



Links: Blindnaht mit 5 kHz, 230 mV; Rechts: Blindnaht mit 7,5 kHz, 250 mV

**Abb. 4-6: Gegenüberstellung der Pendeldichte**

Obwohl beide Nähte eine vergleichbare Breite aufweisen, sind die Umlenkpunkte bei 5 kHz deutlich zu sehen. Dieser Umstand hätte zur Folge, dass bei einer Stumpfstoßschweißung aufgrund der hohen Schweißgeschwindigkeiten im Prozess, nur an den jeweiligen Überfahrten zu und an den Umlenkpunkten wirkungsvoll verbunden wird. Währenddessen bei dichter Pendelung über die gesamte Länge und Breite der Naht geschweißt wird. Zudem wird durch die teilweise Überlappung der einzelnen Übergänge das erkaltende Material der vorherigen Überfahrt erneut aufgeschmolzen, was einen geschlossenen Nahtverlauf und eine höhere Belastbarkeit fördert.

## 4.2 Einflussgrößen auf den Schweißprozess

### 4.2.1 Keyhole- Dynamik

#### 4.2.1.1 Entstehungsprozess

Der Laserstrahl schmilzt das Metall an der Werkstückoberfläche auf und erzeugt dabei Dampf. Wenn der Dampf abströmt, übt er Druck auf die Schmelze aus und verdrängt diese dabei teilweise. Bei weiterem Aufschmelzen des Werkstücks bildet sich ein tiefes, schmales, dampfgefülltes Loch. Dieses wird als Dampfkapillare – auch Keyhole genannt (englisch für Schlüsselloch), bezeichnet. Die Dampfkapillare ist von Metallschmelze umgeben. Wenn sich der Laserstrahl über die Fugestelle bewegt, bewegt sich die Dampfkapillare mit ihm durch das Werkstück. Die Metallschmelze umfließt die Dampfkapillare und erstarrt an der Rückseite. Auf diese Weise bildet sich eine schmale, tiefe Schweißnaht mit gleichmäßigem Gefüge. Die Nahttiefe ist bis zu zehnmal größer als die Nahtbreite und kann je nach Intensität bis zu 25 mm betragen. An den schmelzflüssigen Wänden der Dampfkapillare wird der Laserstrahl vielfach reflektiert. Dabei absorbiert die Schmelze den Laserstrahl fast vollständig, und der Wirkungsgrad des Schweißprozesses steigt. Dabei absorbiert auch der Dampf im Keyhole Laserlicht und wird teilweise ionisiert. Plasma entsteht. Das Plasma bringt ebenfalls Energie ins Werkstück [18]. Dank der relativ hohen Schweißgeschwindigkeit (10 bis 90 m/min im Experiment) ist die Wärmeeinflusszone klein und der Verzug sehr gering.

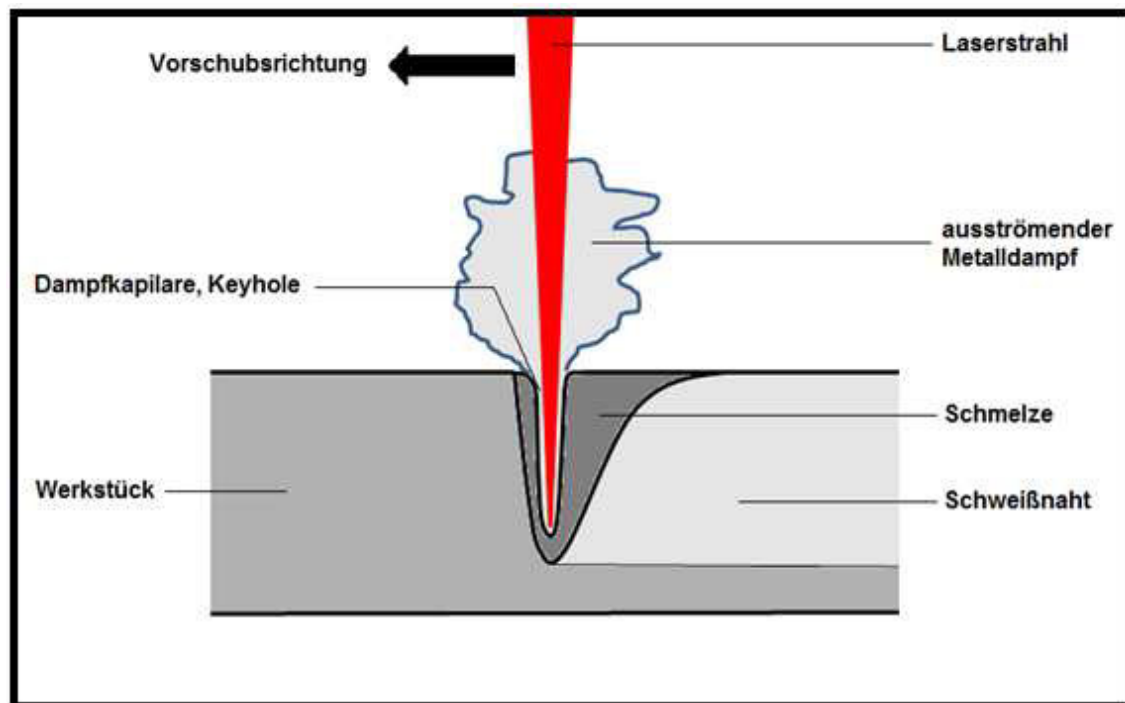


Abb. 4-7: Darstellung der Keyhole- Entstehung



#### **4.2.1.2 Keyhole- Modellierung**

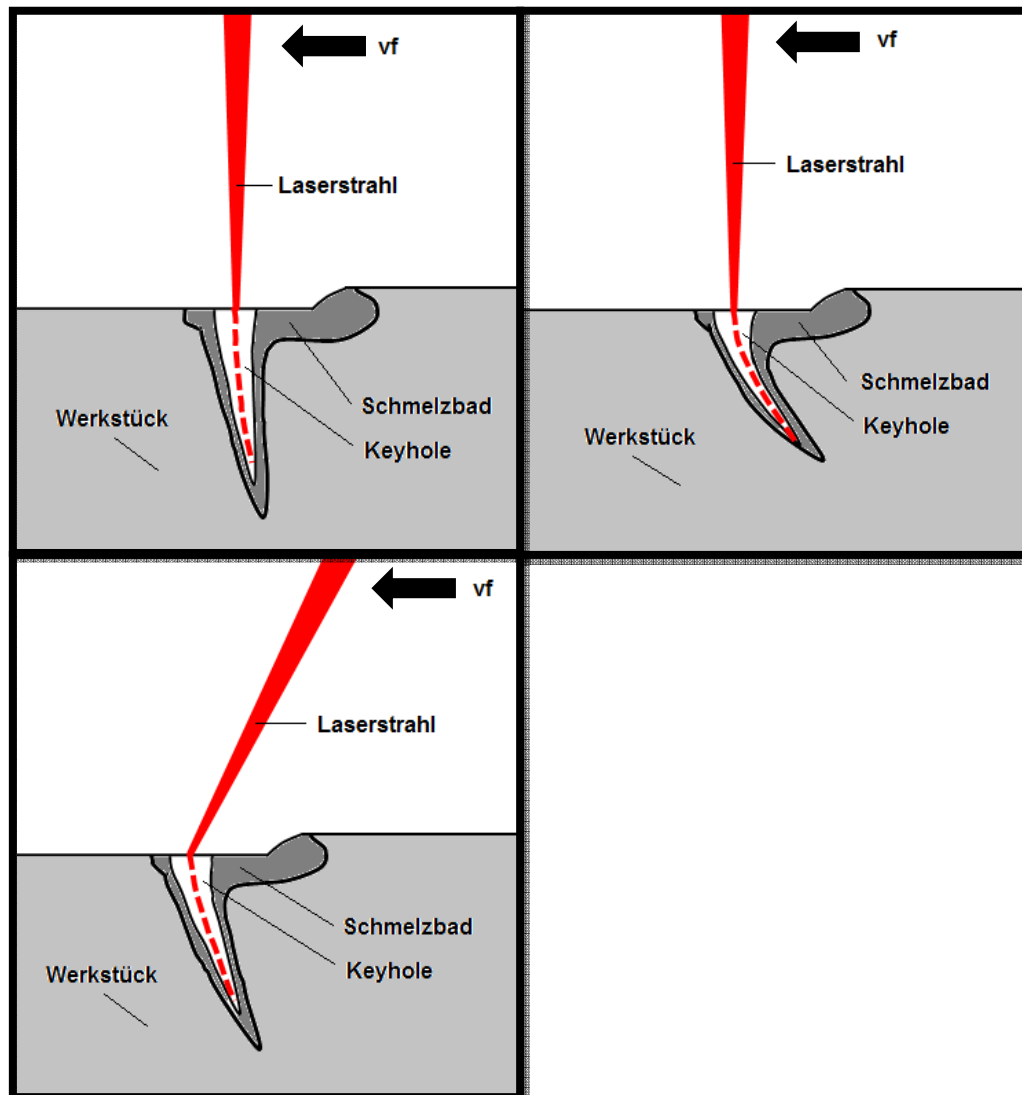
Die Effizienz des Lasertiefschweißens beschränkt sich auf ein eng begrenztes Arbeitsfenster, was zu einer sehr kleinen zu bearbeitenden Fläche führt und dadurch auch zu engen und tiefen Keyholes. Um die Qualität der geschweißten Probe zu erhöhen, ist es erforderlich ein gutes Verständnis der Mechanismen der Schmelzbaddynamik und ihrer Wechselwirkungen zu bekommen. In Veröffentlichungen befassten sich bereits viele Forscher mit dem Verhalten des Keyholes in ihren experimentellen und theoretischen Werken. Diese experimentellen Ansätze bestehen hauptsächlich aus der visuellen Beobachtung des Schweißbades und dem Keyhole, sowie Bewegungen sowohl außerhalb als auch innerhalb des Werkstücks. Neueste Untersuchungen erlauben jedoch auch dynamische Beobachtung des Keyholes und des Plasmas im Werkstoffinneren. So wurde beispielsweise in einer Studie aus jüngerer Zeit über das Schweißen von 304 rostfreiem Stahl mittels eines Hochleistungsfaserlasers die Schmelze, das Schmelzbad und das Keyhole durch eine Hochgeschwindigkeits- Videokamera und Röntgentransmissionsechtzeitabbildung beobachtet. In ihren Schlussfolgerungen wurde u.a. festgestellt, dass die Schweißgeschwindigkeit ein wesentlicher Parameter für die Schmelzbadform und für das Auftreten von Phänomenen wie Porosität ist [19].

Die meisten der Veröffentlichungen definieren das Keyhole als ein stationäres Volumen, das sich mit der Schweißgeschwindigkeit über die Probe bewegt. Zur Untersuchung des Keyholes werden heutzutage bevorzugt 3D- numerische Modellierungen vorgenommen, um sowohl das Metallflussverhalten zu simulieren als auch den Gas-/ Luftstrom, der beispielsweise durch eine Crossdüse hervorgerufen wird. Die erzeugte Strömung des Dampfes während der Laserenergieabsorption im Inneren des Keyholes und die induzierte Reibung auf das Keyhole bzw. die Schmelzbadwand unter Berücksichtigung der Oberflächenspannung der Auftriebskräfte und des Rückstoßdrucks, stellen die Hauptmechanismen dar, die für die Schmelzbadbewegungen verantwortlich sind. Fest- Flüssig- Phasenwechsel, Dampfströmung, Flüssigkeitsströmung und Erstarrung sind die wichtigsten physikalischen Prozesse, die in die 3D- Modellierung aufgenommen werden [19].

#### **4.2.1.3 Auswirkungen des Lasereinstrahlwinkels auf das Keyholeverhalten**

Es wird vermutet, dass wie im Abschnitt „Keyhole- Modellierung“ erwähnt, die Schweißgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Form und das Verhalten des Keyholes hat. Mit ansteigender Schweißgeschwindigkeit krümmt sich das Keyhole entgegengesetzt zur Vorschubrichtung immer stärker, was ein tieferes Eindringen der Laserstrahlung ins Werkstück verhindert und das Keyhole verkleinert [12]. Um diesem Effekt entgegen zu wirken und dadurch hohe Schweißgeschwindigkeiten mit hohen Schweißnahtfestigkeiten zu kombinieren, ist es notwendig dafür zu sorgen, dass sich der Laserstrahl dieser entstehenden Krümmung anpasst. Ein seitliches Auftreffen des Laserstrahls auf die Probenoberfläche in Krümmungsrichtung des Keyholes kann dabei eine einfache und flexible Methode darstellen, da wie in den in dieser Arbeit durchge-

fürten experimentellen Schweißversuchen der Winkel des Schweißkopfes variabel gestaltet ist. Die nachfolgenden Darstellungen sollen diesen Sachverhalt deutlich machen.



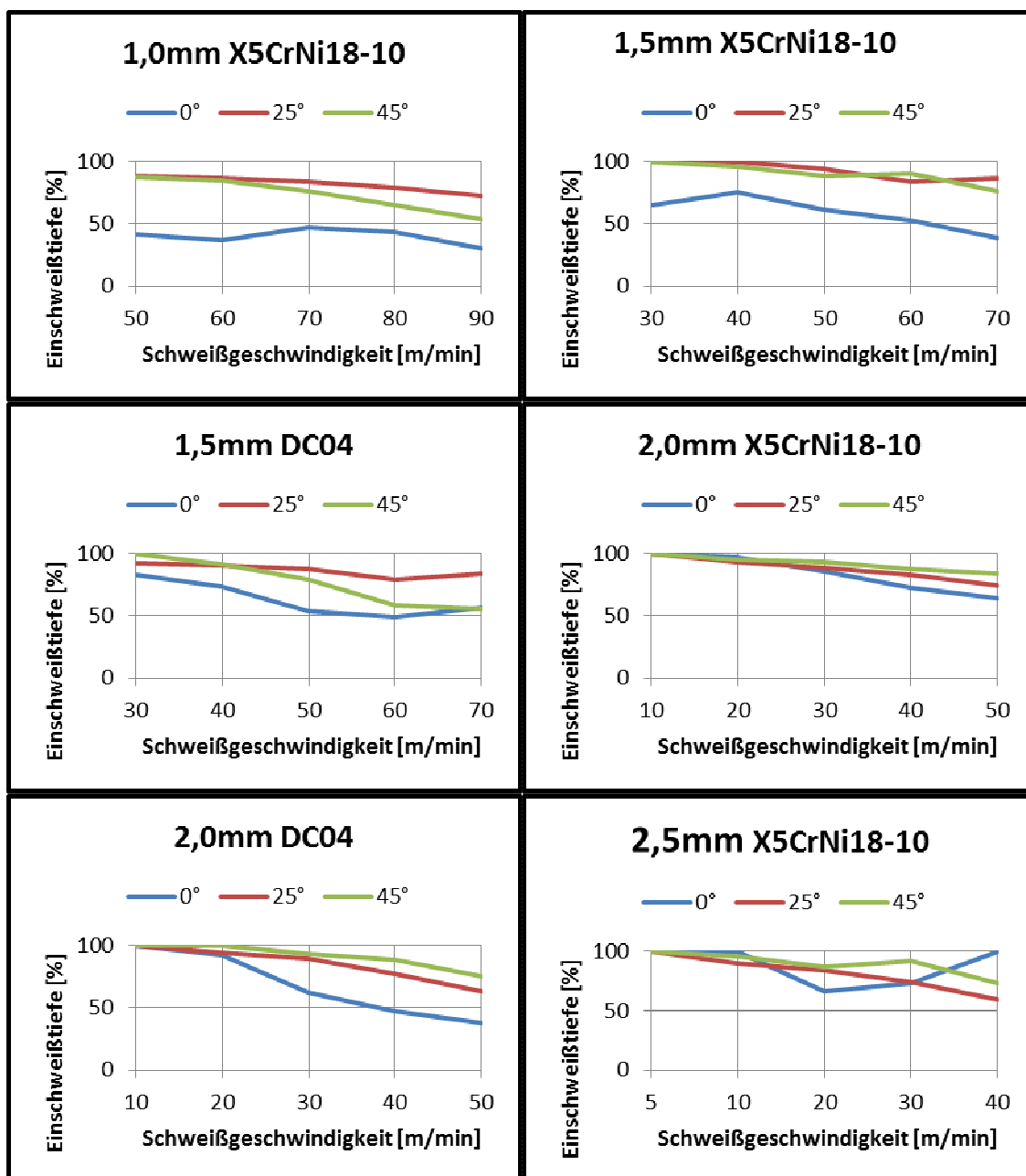
Links oben: senkrechte Lasereinstrahlung bei niedriger Schweißgeschwindigkeit; Rechts oben: senkrechte Lasereinstrahlung bei hoher Schweißgeschwindigkeit; Links unten: schräge Lasereinstrahlung bei hoher Schweißgeschwindigkeit

**Abb. 4-8: Darstellung der Keyhole- Krümmung in Abhängigkeit von Schweißgeschwindigkeit und Lasereinstrahlwinkel**

In [12] wurde zudem gezeigt, dass bei flacheren Lasereinstrahlwinkeln ( $< 25^\circ$ ) die Plasmadampffackel ebenso in einem flacheren Winkel vom Schweißprozessentweicht. Bei steileren Winkeln ab  $25^\circ$  klappt die Plasmadampffackel um und entweicht entgegengesetzt des Lasereinstrahlwinkels. Dieser Effekt hat zur Folge, dass die Plasmadampffackel weiter vom Schmelzbad abgedrängt wird und somit einen kleineren Einfluss auf die Dynamik des Schmelzbades ausübt, was im günstigsten Fall eine zusätzliche Bekämpfung mittels einer Crossdüse überflüssig machen könnte (vgl. dazu Kapitel 4.2.3).

#### 4.2.2 Zusammenhang zwischen Material, Materialdicke, Schweißgeschwindigkeit und Lasereinstrahlwinkel

In den Diagrammen der Abbildung 4-9 wird der Zusammenhang der wichtiger Einflussparameter auf die Durchschweißung grafisch dargestellt. Den Diagrammen liegen die Daten zur Einschweißtiefe anhand der Makroschliffproben zugrunde. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle Proben bei eingeschaltetem Galvometerscanner und unter der Verwendung der Crossdüse stumpfstößgeschweißt. Es wurden jeweils die Lasereinstrahlwinkel vom 0°, 25° und 45° untersucht.



3KW Singlemode Faserlaser; Schweißgeschwindigkeiten von 5 bis 90m/min; X5CrNi18-10 in 1,0 bis 2,5mm; DC04 in 1,5 bis 2,0mm; Lasereinstrahlungswinkel 0°- 25°- 45°

Abb. 4-9: Untersuchungen zur Durchschweißung

Zu sehen ist, dass tendenziell ein gewählter Lasereinstrahlwinkel von  $0^\circ$  zur prozentual geringsten Einschweißtiefe führt. Dieser Umstand ist dabei unabhängig von Material, Materialstärke oder Schweißgeschwindigkeit zu beobachten. Die Einstellung mit  $25^\circ$  Lasereinstrahlwinkel ist besonders für Blechstärken unter 2,0 mm zu empfehlen, da hier geringfügig bessere Einschweißtiefen als mit  $45^\circ$  erzielt wurden. Bei dickeren Materialstärken ab 2,0 mm ist zu beobachten, dass sich die Einschweißtiefe materialunabhängig mit steigendem Einstrahlwinkel erhöht. Eine Besonderheit ist, dass im Gegensatz zur 1,5 mm Blechstärke ein Einstrahlwinkel von bei  $45^\circ$  im Vergleich zur  $25^\circ$  Einstellung zu deutlich verbesserten Einschweißtiefen führt.

Es lässt sich darüber hinaus feststellen, dass die Durchschweißung linear zur eingestellten Schweißgeschwindigkeit abnimmt. Zwar treten vereinzelt Ausreißer auf, welche eine Dissens zur eben aufgestellten These darstellen, jedoch können diese auf negative Beeinflussungen im Schweißprozess, wie beispielsweise Kantenversatz oder ein asymmetrisches Treffen des Fügespalts mit dem Laserstrahl zurückgeführt werden. Damit diese ausgeschlossen werden können, müsste der Probenumfang erhöht werden, um somit eine höhere statistische Sicherheit gewährleisten zu können.

### 4.2.3 Einfluss der Crossdüse

Es ist bekannt, dass im Bereich der Plasmadampffackel die Laserstrahlung stärker absorbiert wird, als von der umgebenden Atmosphäre. Zudem wird vermutet, dass durch die Ausbildung der Plasmadampffackel die Humpingneigung gefördert wird. Aus diesem Grund wird die Crossdüse zur Reduzierung der Humpingneigung bei erhöhter Schweißgeschwindigkeit eingesetzt. Vorangegangene Untersuchungen von Schwind haben gezeigt, dass das Dampfplasma durch eine quer zur Schweißrichtung wirkende Druckluft- oder Schutzgasströmung verdrängt oder unterbunden werden kann. Auf diese Weise soll die Einschweißtiefe, hervorgerufen durch die höhere Intensität, die eingebracht werden kann, erhöht werden [12].

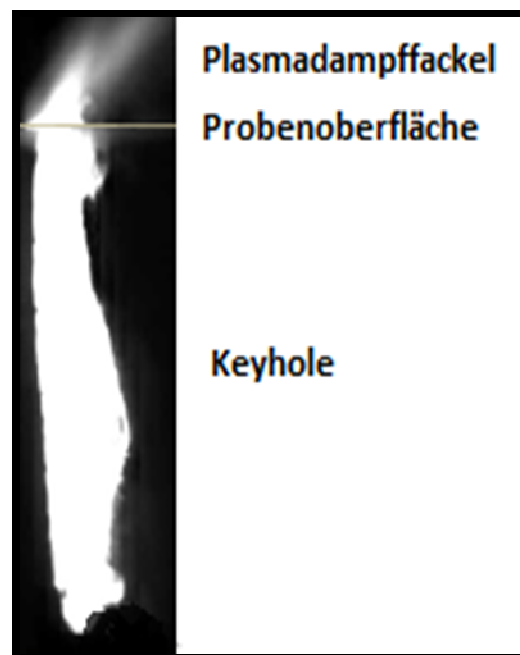


Abb. 4-10: Plasmadampffackel

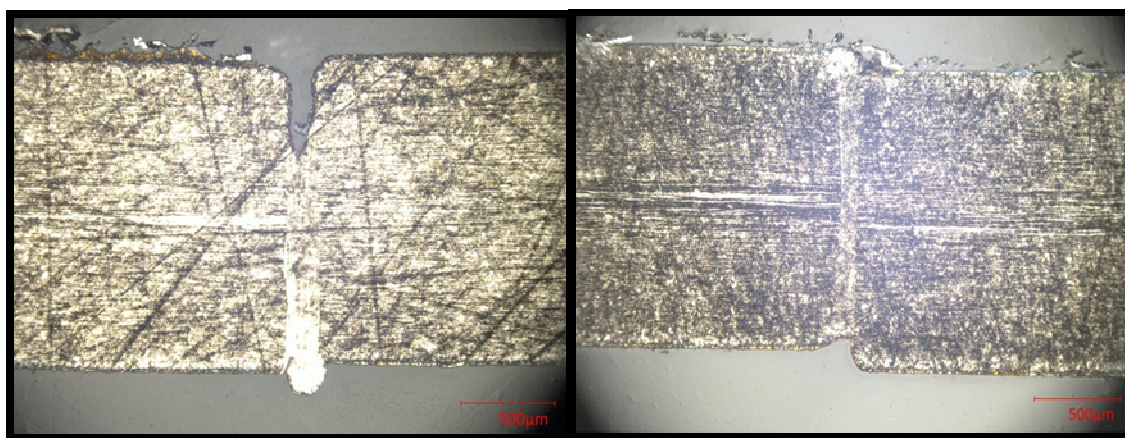
In experimentellen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Blasdüsen hinsichtlich ihrer Strömungscharakteristiken und Reichweite für eine ungestörte Druckluftströmung verglichen. Im Anschluss wurden diese Düsen im Prozess getestet, um die geeignetere Variante auswählen zu können.

Im Folgenden sind das Blasmuster und die entstehende Luftverwirbelung der beiden Düsen nach Herstellerangaben gegenübergestellt [20].

Abstand ab Düsenaustritt [mm]	Blasmuster [mm]			Luftverwirbelung [m/s]	
	973 Flachstrahl Weite	Höhe	705L Laval Ø	973	705L
50	100	40	40	122	253
100	120	60	60	100	203
200	160	100	100	57	103
300	200	140	140	40	76
400	240	180	180	36	55
500	280	220	220	33	50

**Tab. 4-1: Blausausbreitung und Geschwindigkeitsverteilung Blasdüsen 973 und 705L Silvent**

Zuerst kam eine Lavalblasdüse vom Typ „705L“ der Firma Silvent zum Einsatz. Diese sollte durch ihren konzentrierteren Volumenstrom höhere Einschweißiefen fördern und eine wirksame Ablenkung der Plasmadampffackel bewirken. Jedoch hat sich schnell gezeigt, dass auch negative Folgen eintraten. So entstanden vermehrt festigkeitsmindernde Effekte. Die Schmelze wurde durch den hohen Volumenstrom regelrecht aus der Fügezone geblasen, was zu Wurzelüberhöhung (Spiking) führte. Zudem wurde der Prozess unter der Verwendung dieser Düse instabil und reproduzierbare Proben waren rar. Bei der anderen zur Auswahl stehenden Blasdüse handelt es sich um eine Flachstrahldüse vom Typ „973“ der Firma Silvent. Diese produziert einem breitgefächerten Volumenstrom, was diesen insgesamt im Vergleich zur „705L“ abschwächt und dadurch Spiking vorbeugt und gleichzeitig auch die Humpingneigung reduziert. Bei dieser Düse wird abgeschätzt, dass sich ein ungestörter Luftstrahl über eine Entfernung von ca. 30 mm (bzw. bis zum Werkstück) ausbreiten kann. Die Abbildung 4-11 zeigt deutlich, wie sich die beiden Düsen auf das Schweißergebnis auswirken.

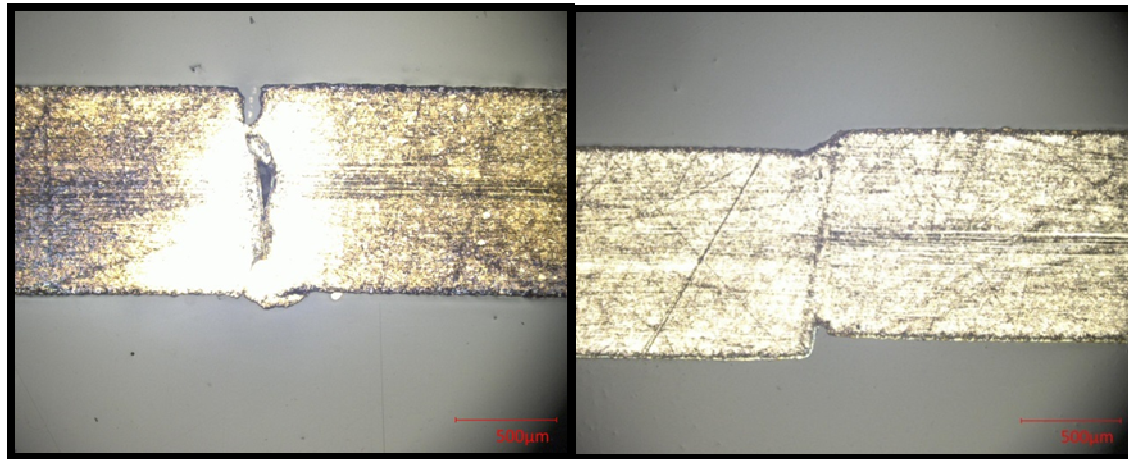


X5CrNi18-10 in 1,5mm bei 40m/min ; Links: 705L; Rechts: 973

**Abb. 4-11: Vergleich Blasdüsen Silvent im Prozess**

### Ermittlung des optimalen Düsenwinkels:

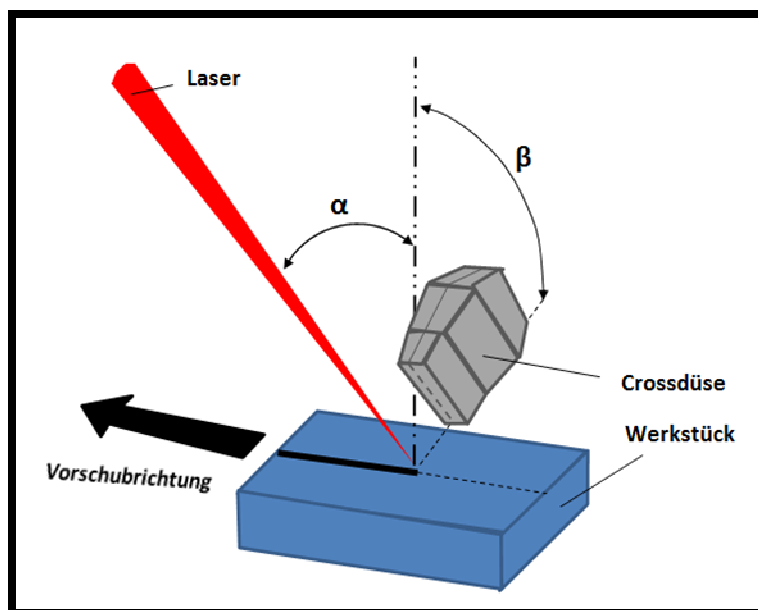
Die Wahl des richtigen Düsenwinkels hat entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit der Crossdüse. Nachdem die Entscheidung zugunsten der „973 Flachstrahldüse“ getroffen wurde gilt es nun, deren optimalen Blaswinkel zu ermitteln. Dazu wurden Blindschweißungen durchgeführt und die Winkellage von 30° und 60° gegenübergestellt.



X5CrNi18-10 in 1,0mm bei 50 m/min; Links: 30° Düsenwinkel; Rechts: 60° Düsenwinkel

**Abb. 4-12: Vergleich des Schweißergebnisses in Abhängigkeit des Düsenwinkels**

Wie in oben zu erkennen ist, weist eine Einstellung mit 60° Düsenwinkel den höheren Prozesserfolg aus (trotz geringem Kantenversatz). Es wird davon ausgegangen, dass ein 30° Winkel die Humpingneigung fördert, was sich weiterführend negativ auf das Keyholeverhalten auswirkt und kein geschlossenes Schmelzbad entsteht, wie im linken Bild zu sehen ist. Die linke Darstellung zeigt die Anordnung der Crossdüse im Bereich des Werkstücks, wie sie für alle weiterführenden Schweißversuche zum Einsatz kommt, schematisch auf. Dabei stellt  $\alpha$  den Einfallswinkel des Laserstrahls (0°/25°/45°) und  $\beta$  den Neigungswinkel der Crossdüse (60°) dar. Die Vorschubrichtung zeigt die Bewegung des Werkstücks auf.



**Abb. 4-13: Schematische Darstellung der Crossdüsenanordnung im Bereich des Werkstücks**



## 4.3 Metallurgische Untersuchungen

### 4.3.1 DC04

#### Grundgefüge

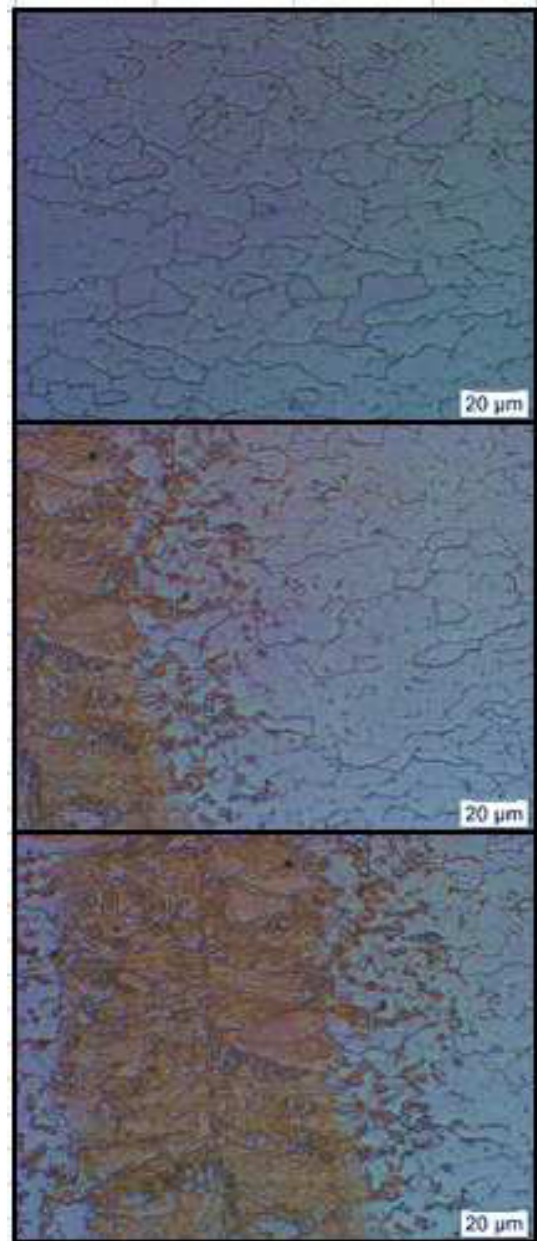
Das Grundgefüge bilden Ferritkörner als Hauptbestandteil mit kleinen kugelförmigen Zementitauscheidungen. Aufgrund des sehr geringen Kohlenstoffgehalts des Werkstoffs kam es im Grundgefüge nicht zu einer Bildung von Perlit.

#### WEZ

Mit zunehmender Annäherung an die eutektische Temperatur im Bereich von 911 bis 723°C kommt es in der Nähe zum Schweißgut verstärkt zu einer Austenitisierung, dabei verhalten sich Ferrit und Zementit wie Perlit. Sie liegen nebeneinander vor, wobei es bedingt durch die schroffe Abkühlung (Selbstabschreckung bedingt durch den Laserprozess) nur zu einer Insel-förmigen Umwandlung kommt und kein „echter“ Perlit gebildet wird, sondern ein Zwischenstufengefüge entsteht.

#### Schweißgut

Im Schweißgut liegt ein Gefüge aus Bainit vor, in das sich auch das ein oder andere Ferritkorn gemischt hat. Deutlich zu erkennen ist, wie die durch den Schweißprozess entstehende Wärme ins Blech abgeleitet wird. Der Bainit bildet dabei Stängel senkrecht zur Abkühlung.



Oben: Grundgefüge; Mitte: Wärmeeinflusszone;  
Rechts: Schweißgut

**Abb. 4-14: Gefügedarstellung DC04 als Mikroschliff**

### 4.3.2 X5CrNi18-10

#### Grundgefüge

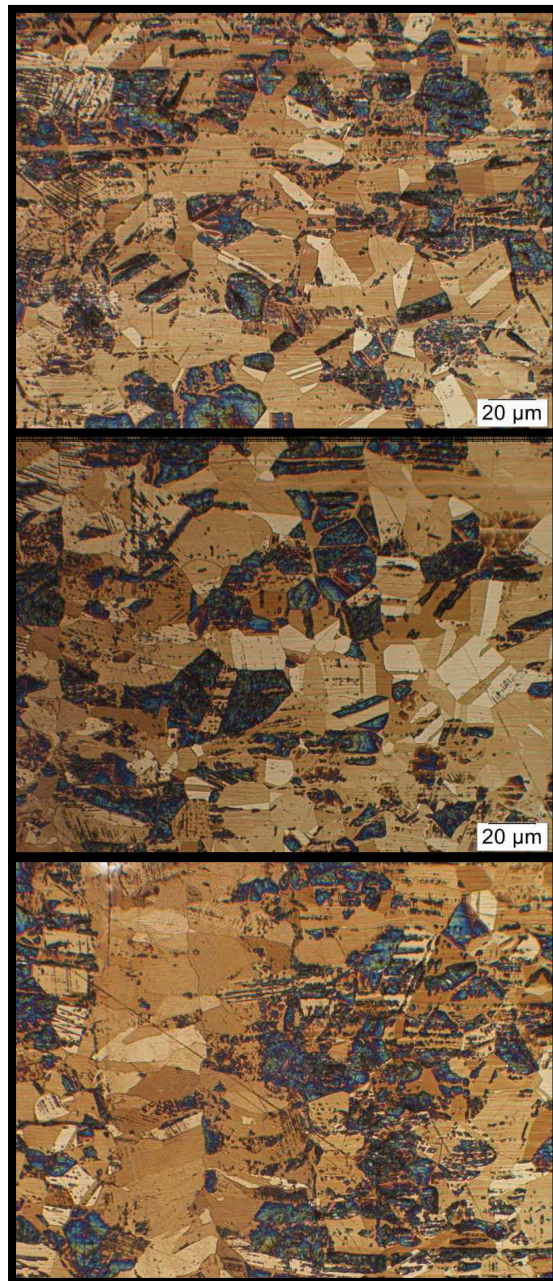
Das Grundgefüge dieses hochlegierten Stahls bilden Austenitkörner in den sich Martensit eingelagert hat. Dieser hat sich durch die Blechherstellung (walzen etc.) gebildet. Des Weiteren sind Gleitbänder zu erkennen, welche sich netzartig in Verformungsrichtung ausgebildet haben. Insgesamt liegt eine sehr gute Kristallisation vor.

#### WEZ

Die Wärmeeinflusszone ist anders als beim DC04 nur gering ausgeprägt und daher auch schlecht zu erkennen. Abgesehen von einem minimalen Kornwachstum finden in der WEZ keinerlei Umwandlungsprozesse statt.

#### Schweißgut

Im Schweißgut sind ebenfalls keine signifikanten Gefügeveränderungen erkennbar. Das Kornwachstum, welches bereits in der WEZ seinen Anfang nahm, setzt sich hier fort. Im Schweißgut finden sich überwiegend Austenitkristalle, da aufgrund der Aufschmelzung durch den Schweißprozess und das anschließende langsame Abkühlen der Austenit neu kristallisiert. Der Martensit benötigt für seine Entstehung entweder eine sehr schroffe Abkühlgeschwindigkeit bzw. eine einwirkende Verformungskraft. Da beides nicht gegeben ist, finden sich im Schweißgut weniger Martensitbestandteile als im Grundmaterial.



Oben: Grundgefüge; Mitte: Wärmeeinflusszone;  
Unten: Schweißgut

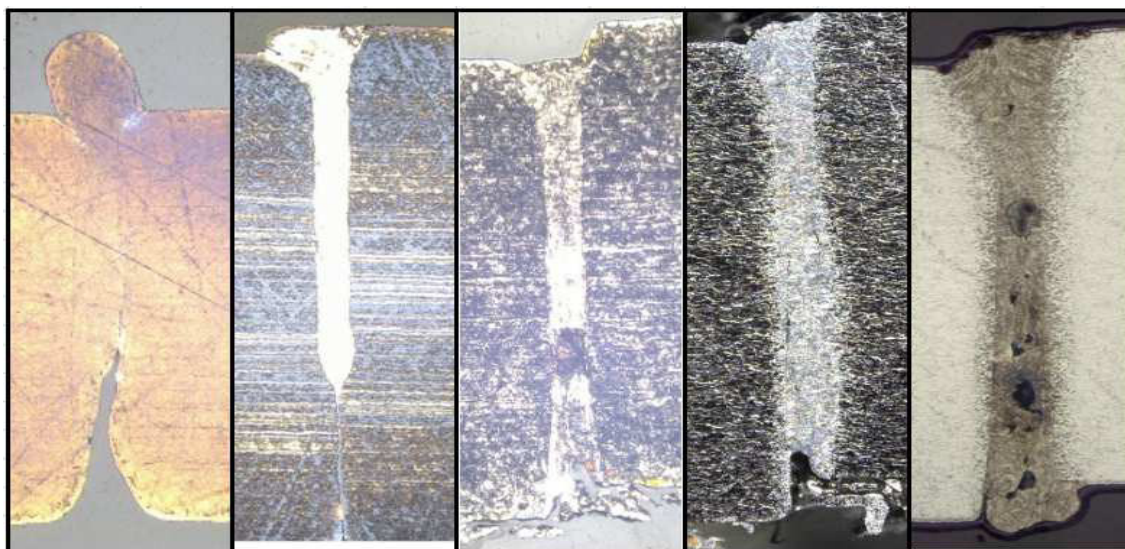
**Abb. 4-15: Gefügedarstellung X5CrNi18-10 als Mikroschliff**



## 5 Ergebnisse und Auswertung

### 5.1 Unregelmäßigkeiten und Schweißfehler

Unregelmäßigkeiten und Schweißfehler stellen ein Problem für jede Schweißnahtgeometrie dar. Damit eine fachgerechte und vergleichbare Aussage über das Vorkommen verschiedener Schweißfehler und Unregelmäßigkeiten getroffen werden kann, wurde eine Bewertung nach DIN EN ISO 13919-1 vorgenommen [21]. Diese vergleicht die Schweißnähte unterschiedlichen Materials und Materialdicke auf etwaige Unregelmäßigkeiten sowie deren Größe und Häufigkeit. Die Fertigungsqualität wird in der Norm durch drei Bewertungsgruppen mit den zugehörigen Toleranzen überprüft. Die Ergebnisse dieser Schweißnahtbewertung sind in Anlage D einzusehen. Der Kontrolle der erzeugten Nähte liegen sowohl Daten aus Sichtprüfungen, unter Verwendung des Digitalmikroskops „VHX100“ der Firma Keyence, als auch die Querschliffaufnahmen der Makroschliffuntersuchungen zugrunde. Die nachfolgende Grafik zeigt typische Schweißfehler, die im Prozess aufgetaucht sind und sich negativ auf die Schweißnahtfestigkeit und die Bruchdehnung auswirken.



Von Links nach Rechts: Nahtüberhöhung X5CrNi18-10 (1,0mm, 50m/min, 45°, Scanner u. Düse an), unzureichende Durchschweißung X5CrNi18-10 (2,5mm, 40m/min, 45°, Scanner u. Düse an), Großer Lunker X5CrNi18-10 (1,5mm, 30m/min, 45°, Scanner an, Düse aus), Wurzelrückfall DC04 (1,5mm, 40m/min, 0°, Scanner aus, Düse an), Poren über die gesamte Nahttiefe verteilt DC04 (2,0mm, 10m/min, 25°, Scanner u. Düse an)

**Abb. 5-1: Darstellung einer Auswahl verschiedener Schweißfehler**

Die Auswertung der Schweißnahtbewertung ergab, dass Unregelmäßigkeiten unabhängig von der jeweiligen Versuchsreihe und des gewählten Parametersatzes auftreten. Materialabhängig bestanden jedoch Unterschiede über die Art und Menge der Unregelmäßigkeiten. Insgesamt neigte der DC häufiger zu Unregelmäßigkeiten als der X5CrNi18-10.

## 5.2 Festigkeitsuntersuchungen

### 5.2.1 Mikrohärtemessung

Die Mikrohärtemessung ist ein Standardmessverfahren zur Ermittlung des Mikrohärteverlaufes von metallischen Werkstoffen. Sie wurde nach DIN EN ISO 6507 durchgeführt. Hierbei wird nach dem Prinzip der Vickers-Härtemessung durch das Eindringen einer vierseitigen Diamantpyramide die Härte des Werkstoffes an verschiedenen Positionen ermittelt [22]. Für die Proben aus X5CrNi18-10 und DC04 wurde eine Druckkraft von 1,0 N (Bezeichnung: HV0,1) verwendet. Nach DIN EN ISO 6507 müssen die Messungen bei einer Materialdicke  $s \leq 4$  mm in der Werkstück- bzw. Blechmitte durchgeführt und zwischen den Messpunkten ein Mindestabstand von 0,1 mm eingehalten werden.

Um eine möglichst genaue Messauflösung zu gewährleisten, wurden insgesamt drei Messreihen pro Härteprüfung angefertigt. Diese Messreihen sind um jeweils 20  $\mu\text{m}$  zueinander versetzt, wie es in Abbildung 5-2 an der Probe aus DC04 zu erkennen ist.

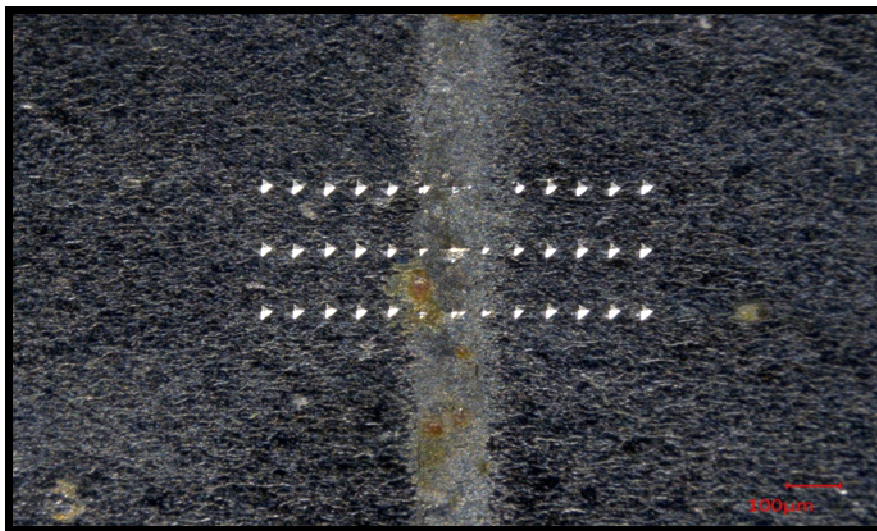


Abb. 5-2: Messreihen Härteprüfung DC04

#### 5.2.1.1 X5CrNi18-10

Wie die vorangegangenen Untersuchungen von Schwind und Wagner gezeigt haben, weist der X5CrNi18-10 keine signifikante Aufhärtung in der Schweißnaht oder der Wärmeeinflusszone auf. Die durchschnittliche Härte des Grundwerkstoffes beträgt 195 HV0,1. Es zeichnet sich ein leichter Härteanstieg im Bereich der Schweißnaht ab. Die gemessenen Härtewerte belegen einen breiten Bereich von  $\pm 0,5$  mm um die Schweißnaht, bei dem die Härte auf bis zu 240 HV0,1 angestiegen ist. Dieser Aufhärtungsbereich wird der breiteren Intensitätseinbringung durch die pendelnde Strahlführung zugeschrieben. Aufgrund des hohen Nickelgehaltes von  $> 8$  % wird im Schweiß-

gut, ebenso wie im Grundwerkstoff, ausschließlich austenitisches Gefüge gebildet. Dabei ist eine thermisch induzierte Änderung des Gefüges beim Abkühlen, bspw. durch Anlasseffekte, ausgeschlossen. Dies zeigt sich, indem sich durch einen Ätzangriff die gleiche Färbung für Grundwerkstoff und Schweißgut ausbildet. Der Austenit kann aufgrund hoher Abkühlgeschwindigkeiten keinen spannungsärmeren Gefügezustand erreichen. Aufgrund der Breite des Bereiches mit erhöhter Härte ist davon auszugehen, dass sich eine WEZ ausbildet. Dabei ist die Gefügebeeinflussung jedoch nur gering, so dass bei der metallurgischen Untersuchung keine differenzierte Anätzung des Grundwerkstoffes und der WEZ erfolgt.

### 5.2.1.2 DC04

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Ergebnisse der Mikrohärtemessung bei senkrechtem, bei 25° sowie bei 45° Lasereinstrahlungswinkel grafisch dargestellt. Dabei wurde der Werkstoff in den beiden Materialstärken 1,5 mm und 2,0 mm, jeweils mit niedriger und hoher Geschwindigkeit untersucht. Auf diese Weise soll der Einfluss dieser Parameter auf eine mögliche Aufhärtung bestimmt werden. Die Härte des Grundwerkstoffes liegt im Durchschnitt bei 142 HV0,1. Je nach Charge schwankt dieser Wert um  $\pm 10$  HV0,1.

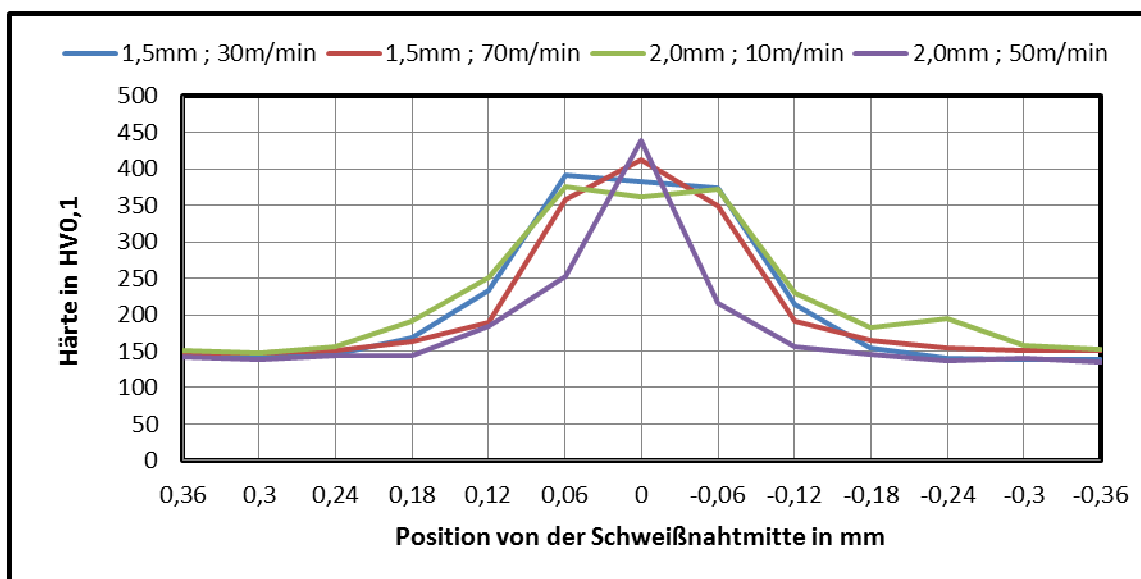


Abb. 5-3: Mikrohärtanalyse DC04 bei senkrechtem Lasereinstrahlungswinkel

Aus dem Diagramm geht hervor, dass der Härteverlauf gaußförmig verteilt ist. Im Zentrum der Schweißnaht ist die Aufhärtung am höchsten und erreicht Werte zwischen 360 und 438 HV0,1. Dabei deutet sich an, dass bei Zunahme der Schweißgeschwindigkeit auch eine Steigerung der maximalen Aufhärtung zu verzeichnen ist.

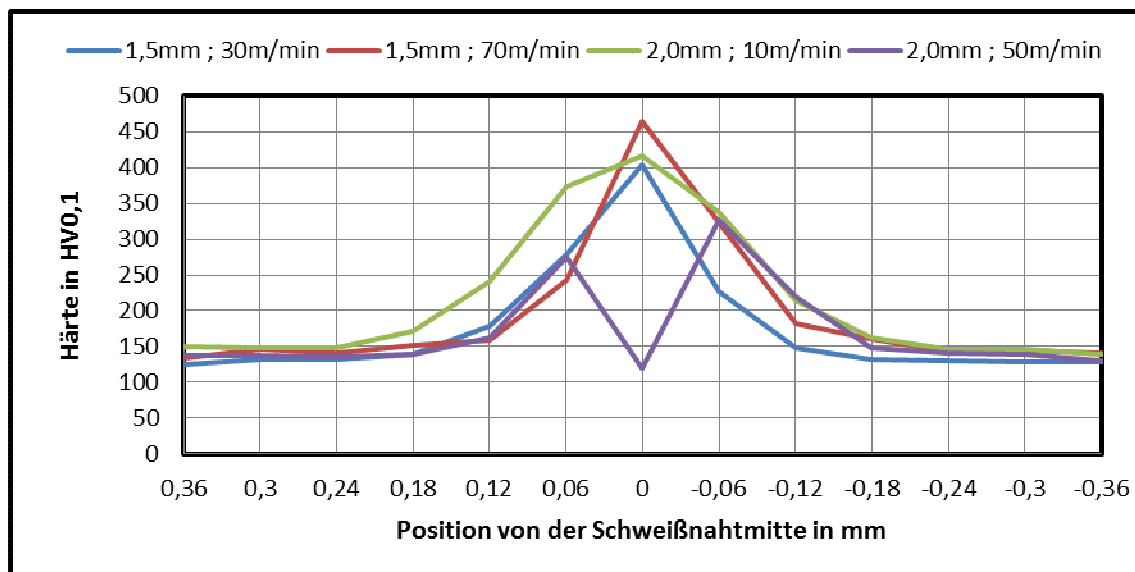


Abb. 5-4: Mikrohärteanalyse DC04 bei 25° Lasereinstrahlwinkel

Ähnlich wie in Abbildung 5-3 ist auch dieser Härteverlauf gaußförmig. Wie in der vorangegangenen Versuchsreihe steigt die Härte mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit beim 1,5 mm Material. Bei 2,0 mm Blechstärke fällt auf, dass bei hoher Schweißgeschwindigkeit die Versprödung des Materials in der Schweißnahtmitte extrem zunimmt, sodass die Spitze der Diamantpyramide die Naht durchbrochen hat, da die Nahtfestigkeit an dieser Stelle stark beeinträchtigt ist. Daraus resultiert, dass die Aufhärtung mit steigender Geschwindigkeit noch stärker ansteigt, als das beim 1,5 mm Material der Fall ist.

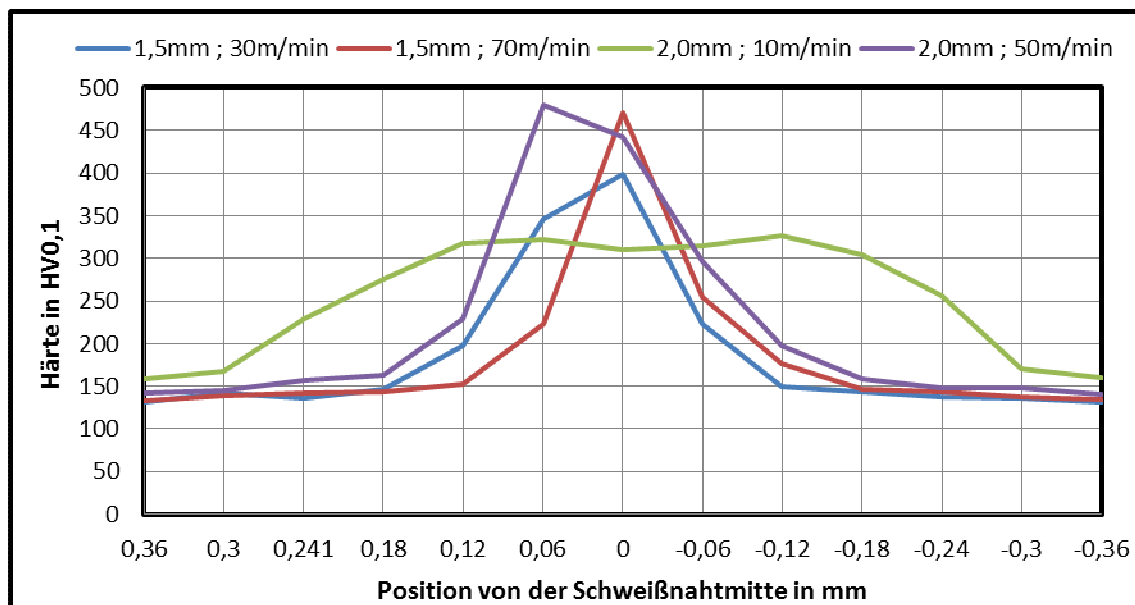


Abb. 5-5: Mikrohärteanalyse DC04 bei 45° Lasereinstrahlwinkel

Die Untersuchungen mit 45° Einstrahlung untermauern die These der vorangegangenen Versuchsreihe, dass mit steigender Schweißgeschwindigkeit auch die Aufhärtung zunimmt. Dieser Effekt tritt verstärkt mit zunehmender Materialdicke auf.

Zusammenfassend hat die Mikrohärtuntersuchung ergeben, dass die Parameter Schweißgeschwindigkeit und Materialdicke sich wesentlich auf den Mikrohärtverlauf des DC04 auswirken. Bei geringerer Materialdicke nimmt der Einfluss der Schweißgeschwindigkeit ab und bei größerer Materialdicke nimmt er zu. Eine erhöhte Aufhärtung des Werkstoffs in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone hat zur Folge, dass die Versprödung sprunghaft zunimmt, was die Festigkeitseigenschaften der Naht negativ beeinflusst. Zudem wird die Poren- und Rissbildung gefördert, was die Nahtfestigkeit zusätzlich herabsetzt.

Resultierend kann man festhalten, dass die Schweißbeignung des Werkstoffs für den Laserschweißprozess nur gegeben ist, wenn das Prozessfenster eingehalten wird und gewährleistet ist, dass die Aufhärtung einen festzulegenden Grenzwert nicht überschreitet. Dies kann u.a. mit der Anpassung der Abkühlgeschwindigkeit bzw. der Verwendung von Schutzgas reguliert werden, sodass auch eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit denkbar ist.

### 5.2.2 Zugprüfung

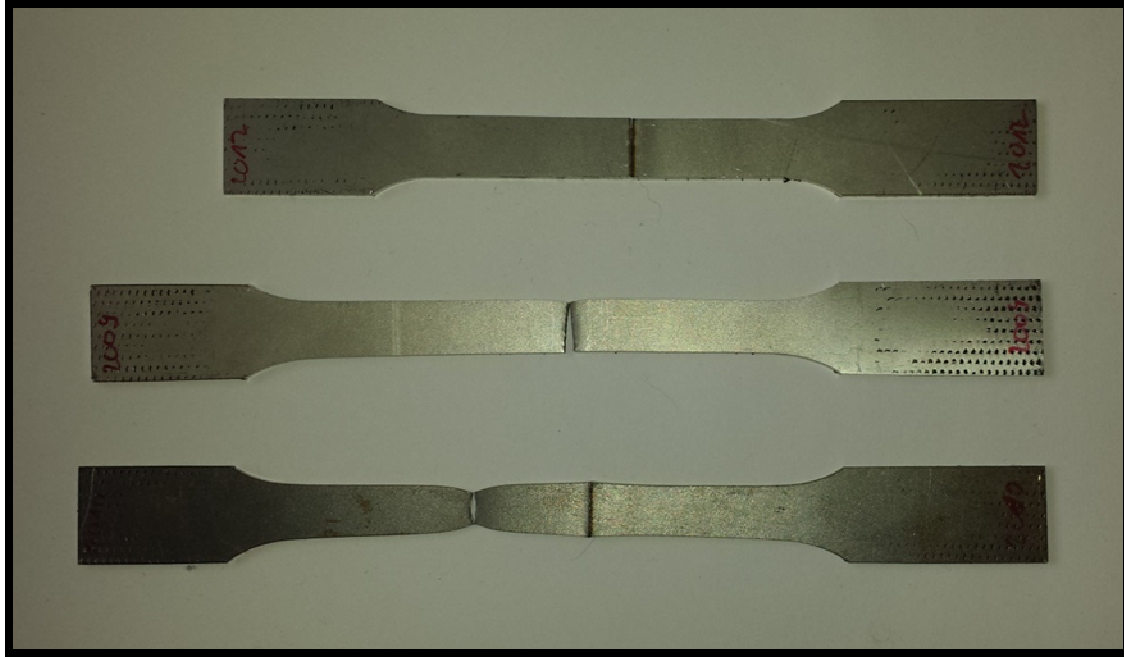
Nach [23] ist Der Zugversuch ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und weiterer Werkstoffkennwerte. Überdies kann hiermit die Belastbarkeit von Volumenkörpern und Verbindungen (bspw. Schweiß- oder Schraubverbindungen) auf Zug untersucht werden.

Die Zugversuche wurden sowohl an den Proben aus X5CrNi18-10 wie auch DC04 nach DIN EN ISO 6892-1 [23] durchgeführt. Hierbei ist darauf zu achten, dass mit zwei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten gearbeitet wurde. Zunächst mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min bis zu einer Vorspannkraft von 500 N, zur Überwindung der elastischen Verformungsanteile und danach mit 10 mm/min bis zum Bruch der Zugproben. Sämtliche Proben wurden mit der Zugmaschine „InspectRetrofit 100 kN MFX“ der Firma Hegewald & Peschke gezogen.



Abb. 5-6: Zugprüfung





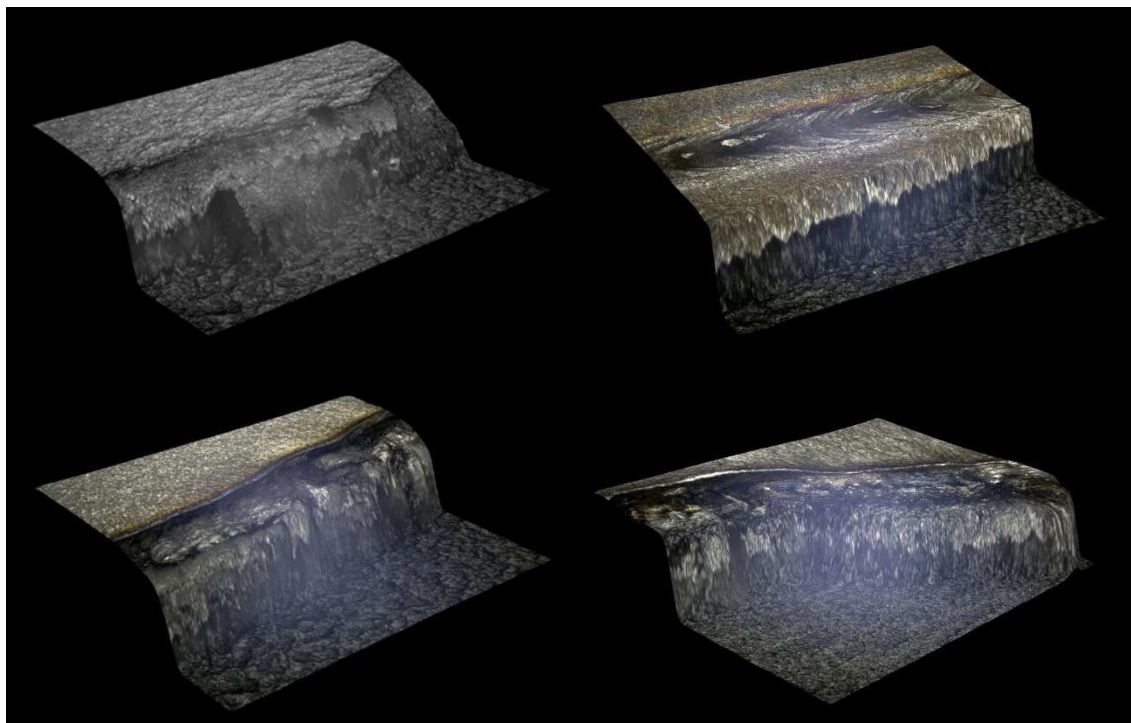
Oben: Zugprobe in Ausgangslänge; Mitte: Probe X5CrNi18-10 gezogen; Unten: Probe DC04 gezogen

**Abb. 5-7: Darstellung vom Zugproben mit 2,0mm Materialdicke**

Wie im oberen Bild dargestellt, wurden die Zugproben, welche entsprechend der Norm DIN 50125 H [24] auf die vorgeschriebenen Abmaße mittels Laser geschnitten wurden, bis zum Versagen des Materials bzw. der Schweißnaht gezogen. Die ermittelten Daten wurden über eine Software auf einen Arbeitsrechner übertragen und dort nutzbar gemacht. In den in Anlage E abgebildeten Tabellen sind die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst dargestellt. Die linke Tabellenhälfte gibt dabei Auskunft über die veränderlichen Prozessparameter. In der rechten Hälfte sind die Werte der Zugprüfung abgebildet. Dabei sind besonders die Ergebnisse für die maximale Prüfkraft, welche notwendig für das Zerreißen der Proben war, die Zugfestigkeit sowie die Bruchdehnung von Bedeutung. Die abgebildeten Werte sind Durchschnittswerte. Es wurden pro Parametereinstellung drei Zugprüfungen durchgeführt und die Werte zusammengefasst, um so die statistische Sicherheit sowie die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen. In den Spalten „%“ werden die Festigkeitswerte mit den Standardwerkstoffkennwerten (siehe dazu Kapitel 3.3) prozentual verglichen. Proben, die aufgrund der Selektion auf Grundlage der Makroschliffproben als nicht besonders vielversprechend betrachtet werden, gelten als „ungeeignet“ und sind in den Tabellen entsprechend vermerkt. Da ein großes Ziel der Untersuchungen die Ermittlung der maximal möglichen Schweißgeschwindigkeiten ist, wurden für den Zugversuch nur die Proben verwendet, welche sowohl mit hoher Geschwindigkeit geschweißt wurden und gleichzeitig aufgrund ihrer Schweißnahttiefe ausreichende Festigkeitseigenschaften vermuten lassen. Daher wurden Proben mit gleichen Schweißparametern, aber geringerer Geschwindigkeit, nicht untersucht. Sie sind als „ungeprüft aber geeignet“ eingestuft und gekennzeichnet.

### 5.2.2.1 Beurteilung der Bruchkanten

Die entstehenden Bruchkanten durch den Zugversuch weisen grundsätzlich zwei Charakteristiken auf. Die Mehrzahl der Proben ist direkt im Schweißgut gerissen, während in Ausnahmefällen auch ein Bruch deutlich oberhalb der Schweißnaht nach einer deutlichen Einschnürung auftrat. Dabei ist zu erkennen, dass der Grundwerkstoff einen diagonalen Bruch aufweist. Dies ist ein normales Verhalten und wird darauf zurückgeführt, dass sich die Bruchebene in der Ebene der größten Schubspannung im Metallgitter ausbreitet. Diese ist für gewöhnlich in einem  $45^\circ$  Winkel zur angreifenden Kraft ausgerichtet. Der Bruch einer geschweißten Naht weist ein anderes Verhalten auf. Zunächst wird festgestellt, dass sich der Bruch entlang der Schweißnaht ausbildet. Dabei bildet sich ein senkrechter Anriss (Ausgangspunkt des Bruches) direkt im Schweißgut. Im weiteren Verlauf der Rissausbildung wird der Rissfortschritt entlang der größten Schubspannung diagonal fortgesetzt. Mögliche Ursachen für ein Reißen direkt in der Naht können Seigerungen und andere Schweißnahtfehler wie Lunker sein, welche die Naht entsprechend schwächen bzw. kann ein Vorhandensein von Kerben aufgrund des Wurzelrückfalls Auslöser des Bruchverhaltens sein. In seltenen Fällen beginnt das Risswachstum im Schweißgut und setzt sich dann schräg durch den Grundwerkstoff fort. Die nachfolgende Grafik zeigt dabei typische Rissverläufe auf. Die Aufnahmen wurden mit der Tiefenschärfefunktion eines Keyence VHX100 Digitalmikroskops aufgenommen, wobei dieses keine Überhänge abbilden kann, sondern stattdessen senkrechte Kanten interpoliert.



Linksoben: Bruch im Grundwerkstoff; Rechtsoben: Bruch neben der Schweißnaht; Linksunten: Bruch entlang der Schweißnaht; Rechtsunten: Bruch vom Schweißgut in den Grundwerkstoff

**Abb. 5-8: 3D- Darstellung der Bruchkanten nach Zugversuch mit Keyence VHX100**

### 5.2.2.2 Auswertung und Interpretation

Auf Grundlage der Übersichtstabellen zu den ermittelten Festigkeitseigenschaften der stumpfstoßgeschweißten Zugproben kann das Verhalten des Laserschweißprozesses im Hinblick auf die wesentlichen Prozessparameter abgeleitet werden.

Besonderes Augenmerk wird auf den Einfluss des Lasereinstrahlungswinkels, der Schweißgeschwindigkeit, der Bahnbewegung und der Entgegenwirkung der Plasmadampffackel mittels Crossdüse gelegt. Die weiteren Variablen sind dabei Material und Materialdicke.

#### Einfluss der Schweißgeschwindigkeit:

Material	Maximal erreichbare Festigkeit [%]			V <sub>max</sub> [m/min]
	0°	25°	45°	
1,0 mm (1.4301)	120,5	44,8	-	70
1,5 mm (1.4301)	87,8	-	65,4	50
1,5 mm (1.0338)	-	32,5	94,2	40
2,0 mm (1.4301)	115,2	80,9	108,9	30
2,0 mm (1.0338)	93,3	109,8	117,7	20
2,5 mm (1.4301)	112,1	-	121,6	20

Tab. 5-1: Übersicht über max. erreichbare Festigkeitswerte unter einer festgelegten max. Geschwindigkeit im prozentualen Vergleich mit Standardwerkstoffkennwerten

Die oben stehende Tabelle zeigt die prozentuale Festigkeit der Schweißverbindungen in Verbindung mit den dabei max. erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten  $v_{\max}$  in Abhängigkeit zu Material und Materialdicke bei den drei verschiedenen Lasereinstrahlungswinkeln. An dieser Stelle sei noch einmal auf das Kapitel 3.2.5 verwiesen, in welchem die schrittweise Steigerung der Schweißgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Materialstärke beschrieben ist.

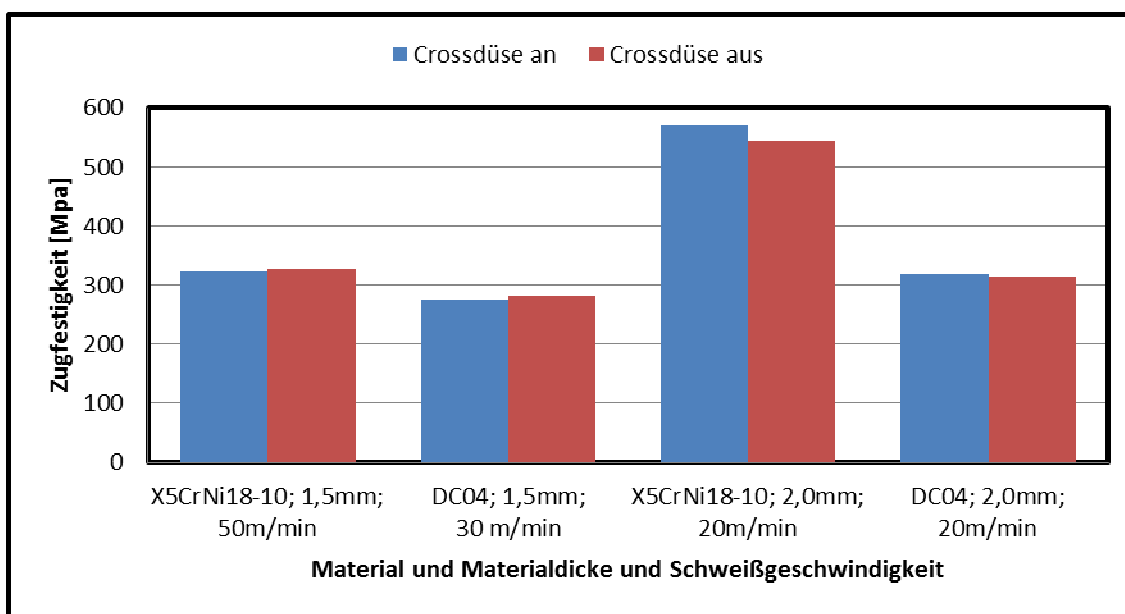
Erkennbar ist, dass mit zunehmender Materialdicke die maximal mögliche Schweißvorschubgeschwindigkeit absinkt. Die dabei höchsten Geschwindigkeitswerte bietet 1,0 mm X5CrNi18-10 mit 70 m/min und einer um 20 % gesteigerten Festigkeit gegenüber den Standardwerkstoffkennwerten. Mit 80 m/min waren immerhin noch 82,8 % der Grundfestigkeiten erreichbar, was unter Umständen für leichte bis mittlere Schweißnahtbeanspruchungen ausreichen kann.

Auffällig ist, dass die maximal zu erreichende Geschwindigkeit beim DC04 um ca. 10 m/min niedriger ist als beim X5CrNi18-10 mit gleicher Materialdicke. Eine Ursache dafür kann die, im Schweißprozess entstandene, Aufhärtung des Werkstoffes sein, welche zu Versprödung und Spannungsrissen führen kann.



### Einfluss der Crossdüse:

Wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben wurde, aus den genannten Gründen, im späteren Verlauf der Untersuchungen auf die bewährte Flachstrahldüse vom Typ 973 der Firma Silvent zurückgegriffen. Ihr konkreter Einfluss auf den Schweißprozess soll hier veranschaulicht werden. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften durch den Einsatz der Crossdüse bei unterschiedlichen Blechstärken von DC04 und X5CrNi18-10:



**Abb. 5-9: Einfluss der Crossdüse auf die Zugfestigkeit von DC04 und X5CrNi18-10 in den Materialdicken 1,5mm und 2,0mm bei 45° Lasereinstahlung**

Erkennbar ist dabei, dass bei 1,5 mm Materialdicke werkstoffunabhängig eine minimal höhere Festigkeit bei ausgeschalteter Crossdüse erreicht wurde. Ab 2,0 mm ändert sich dieses Verhältnis ins Gegenteil, sodass nun leicht gesteigerte Festigkeiten unter der Verwendung der Crossdüse erzielt werden konnten. Insgesamt spielt die Crossdüse für die Belastbarkeit der Schweißnähte bei winkelbehafteter Lasereinstrahlung aber eine untergeordnete Rolle.

### Einfluss des Galvometerscanners:

Die Hauptaufgabe des Galvometerscanners ist Überbrückung des Fügespalts. Durch eine Überlagerung der Bahnbewegung soll zudem ein geschlossenes Schmelzbad entstehen, was der Nahtfestigkeit zuträglich ist. Zur Ermittlung des tatsächlichen Einflusses wurde eine Versuchsreihe unter der Verwendung des Scanners bzw. mit ausgeschaltetem Scanner durchgeführt. Dabei war ein interessanter Verlauf zu erkennen. Der Scanner als Einflussgröße ist direkt mit den Faktoren Materialdicke und Einstrahlwinkel des Lasers gekoppelt und kann daher nicht getrennt betrachtet werden. Um den Einfluss des Galvometerscanners dennoch herauszuarbeiten, wurde Tab. 5-2 erstellt.

Diese zeigt den Zusammenhang der Einflussgrößen bei ein- und ausgeschaltetem Galvometerscanner.

<b>Einstrahlwinkel</b>	<b>0°</b>				<b>45°</b>	
<b>Scannereinsatz</b>	<b>An</b>		<b>Aus</b>		<b>An</b>	
	<b>Nahtfestig- keit [Mpa]</b>	<b>%</b>	<b>Nahtfestig- keit [Mpa]</b>	<b>%</b>	<b>Nahtfestig- keit [Mpa]</b>	<b>%</b>
<b>1,0 mm (1.4301)</b>	-	-	602,6	120,5	-	-
<b>1,5 mm (1.4301)</b>	-	-	438,9	87,8	392,5	78,5
<b>1,5 mm (1.0338)</b>	-	-	-	-	275,3	102
<b>2,0 mm (1.4301)</b>	152,2	30,4	576,2	115,2	569,8	114
<b>2,0 mm (1.0338)</b>	160,9	59,6	252	93,3	317,9	117,7
<b>2,5 mm (1.4301)</b>	289,2	57,8	560,4	112,1	608	121,6

**Tab. 5-2: Einfluss des Galvometerscanners in Verbindung mit anderen Parametern auf die Schweißnahtfestigkeit**

Aus der Tabelle geht hervor, dass sich eine Überlagerung der Bahnbewegung mittels Galvometerscanner bei senkrechter Lasereinstrahlung als negativ beeinflussende Größe auf die Schweißnahtfestigkeit auswirkt. Erst ab einer Mindestblechstärke von 2,0 mm machte eine Zugprüfung überhaupt erst Sinn. Die maximal ermittelten Nahtfestigkeiten sind bei linearer Bahnbewegung um ein vielfaches höher und übersteigen teilweise die Standardkennwerte des Grundwerkstoffs um 12 bis 20 %, während bei überlagerter Bahnbewegung nicht einmal 60 % erreicht werden. Anders verhält es sich in einem Lasereinstrahlwinkel von 45°. Die Nahtfestigkeiten mit überlagerter Bahnbewegung sind deutlich erhöht und wachsen linear mit steigender Materialdicke an. Dabei zeigt der DC04 eine andere Charakteristik als der X5CrNi18-10. Während bei senkrechter Einstrahlung und linearer Bahnbewegung die Festigkeitseigenschaften des DC04 deutlich hinter denen des X5CrNi18-10 blieben (nämlich 22 % bei 2,0 mm und 33 % bei 1,5 mm), ändert sich dies bei 45° Einstrahlung. Die Festigkeitswerte liegen prozentual sichtbar über denen des X5CrNi18-10 bei gleicher Materialdicke (4 % bei 2,0 mm und 24 % bei 1,5 mm).

### **Einfluss des Lasereinstrahlwinkels:**

#### *Senkrechte Lasereinstrahlung:*

Für Materialdicken von 1,0 mm und darunter ist ein senkrechter Laserstrahleinfall am günstigsten. Wie im Abschnitt „Einfluss des Galvometerscanners“ bereits analysiert, ist für das Schweißen mit dieser Kopfeinstellung eine lineare Bahnbewegung notwendig, um belastbare Schweißverbindungen zu kreieren. Aus den Makroschliffuntersuchungen geht hervor, dass sehr starke Humping- Effekte auftraten und aufgrund der Pendelung eher Abtragungs- als Schweißprozesse realisiert wurden. Ebenfalls ist es möglich, Bleche ab 2,0 mm mit linearer Bahnbewegung belastbar zu verschweißen, wobei sich der X5CrNi18-10 als günstiger erwiesen hat.

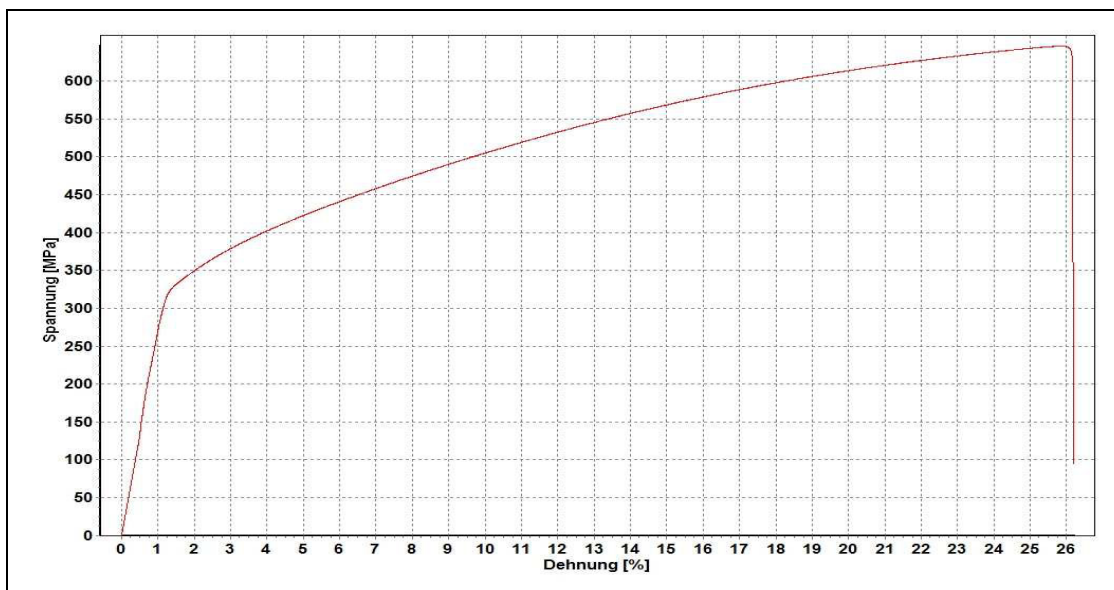


Abb. 5-10: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 1,0 mm bei 0° Einstrahlungswinkel, linear

*25° Lasereinstrahlung:*

Die Einstellung mit 25° Einfallswinkel stellt einen Übergangsbereich zwischen senkrechter Einstrahlung mit linearer Bahnbewegung und 45° Einstrahlung mit gependelter Bahnbewegung dar. Belastbare Festigkeiten bei ausreichend hohen Geschwindigkeiten sind dabei eine Seltenheit. Oft schwanken die Werte selbst innerhalb eines Parametersatzes, was die statistische Sicherheit der Untersuchungsergebnisse herabsetzt. Zudem ist die Bruchdehnung sehr eingeschränkt, was zu sprunghaftem Versagen der Schweißnaht führt (siehe Abbildung 5-11).

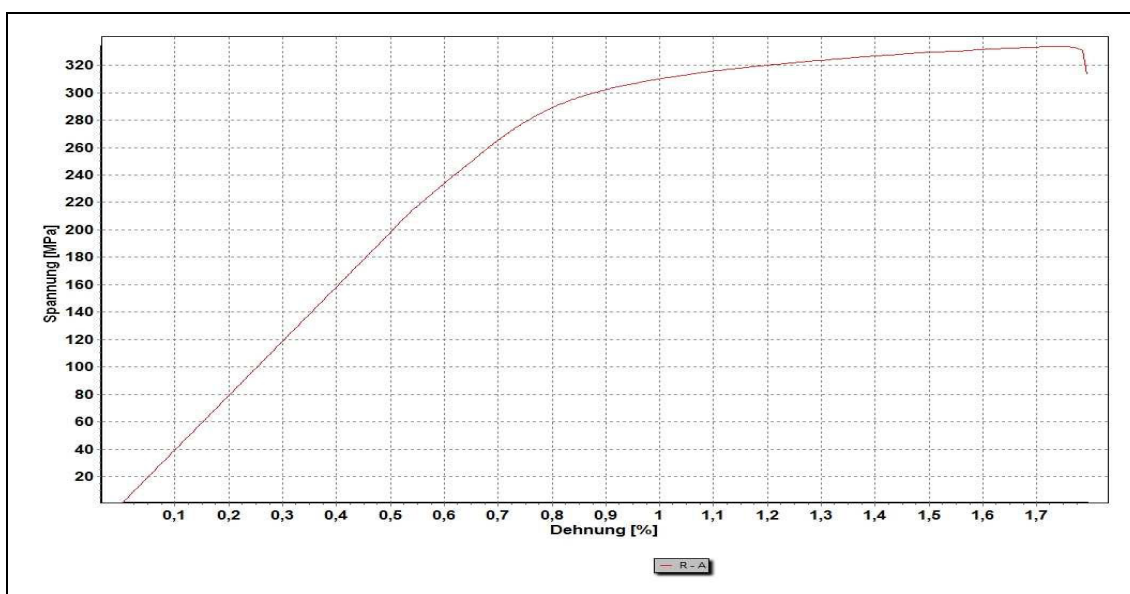


Abb. 5-11: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 1,5 mm bei 25° Einstrahlungswinkel, linear

### 45° Lasereinstrahlung:

Für die Blechstärken ab 2,0 mm macht eine seitliche Lasereinstrahlung in einem Winkel um 45° Sinn. Die Festigkeitseigenschaften sind dabei konstant auf dem Level der Werkstoffgrundwerte angesiedelt und übertreffen diese teilweise sogar um bis zu 21 %. Um dies zu erreichen ist eine Pendelung des Laserstrahls erforderlich, um bei dieser schrägen Lasereinstrahlung die Keyholdynamik entsprechend positiv zu beeinflussen (vgl. Kapitel 4.2.1). Da das Verhältnis zwischen Luftspalt zwischen den beiden zu fügenden Blechen und der Materialstärke bei dickeren Blechen geringer ist, hat es auch einen kleineren Einfluss auf die Schweißbeignung. Dies hat höhere Nahtfestigkeiten zur Folge. Materialstärken von 1,5 mm verhalten sich werkstoffabhängig verschieden.

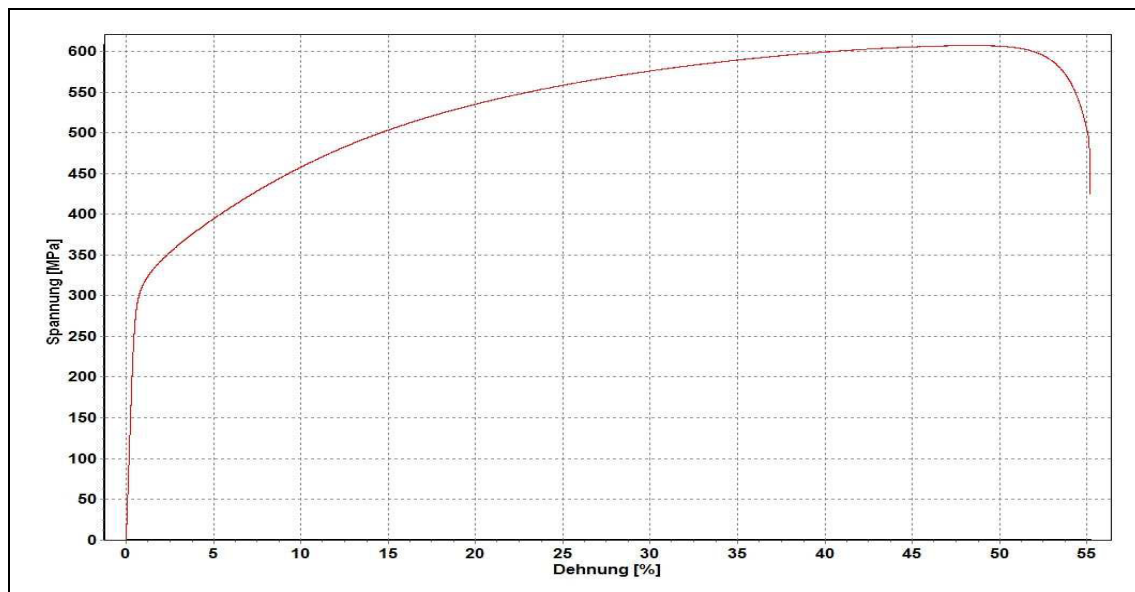


Abb. 5-12: Spannungs- Dehnungsverlauf X5CrNi18-10 in 2,5 mm bei 45° Einstrahlungswinkel, gependelt

### 5.3 Ermittlung des optimalen Prozessfensters

Im folgenden Kapitel wird erläutert, wodurch der Hochgeschwindigkeitslaserschweißprozess bin der vorliegenden Arbeit optimiert wird und welche Effekte sich daraus ergeben.

Die Haupteinflussgrößen auf den Hochgeschwindigkeitslaserschweißprozess gehen vom Schweißkopf. Dieser beherbergt verschiedene Parameter, deren Zusammenspiel maßgeblich zum Schweiß Erfolg beiträgt. Mit einem Fokussierobjektiv, welches über eine Brennweite von 250 mm verfügt, wird ein Strahlfleckdurchmesser von 53  $\mu\text{m}$  erzeugt. Die Vorschubbewegung wird über ein Linearachssystem realisiert. Davon unabhängig kann der Lasereinstrahlwinkel mit Hilfe des integrierten Drehadapters im Schweißkopf winkelbehaltet ( $0^\circ$  bis  $50^\circ$ ) eingestellt werden. Dabei erfolgt die Positionierung des Lasers statisch. Unter der Verwendung des Galvometerscanners kann dieser mit einer überlagerten Bahnbewegung ausgestattet werden, welche dafür sorgt, dass der Laserstrahl an Breite gewinnt, um auf diese Weise auch große Fügepalten zu überbrücken.

Äußere Einflüsse sind u.a. die Relativbewegung des Werkstücks (mit der entsprechenden Spannhalterung), diese wird über ein Linearachssystem realisiert. Die Nutzung eines speziellen Cross- Jet-/ Cross- Düsensystems stellt eine weitere Prozessbeeinflussung dar. Diese wird unmittelbar an der Fügezone induziert. Die dabei einzuhaltenen Randbedingungen beziehen sich auf die Nahtgeometrie sowie die Schweißgeschwindigkeit. Demnach werden die Prozessparameter in den Festigkeitsuntersuchungen weiter untersucht, bei denen eine vollständige Durchschweißung über die gesamte Schweißnahtlänge sowie eine humping- / spikingfreie Schweißnahtoberfläche zu erwarten war. Verwendung finden zwei verschiedene Werkstoffe: DC04 und X5CrNi18-10. Auf diese Weise soll der Einfluss von Legierungselementen und unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften auf die Schweißnahtfestigkeit überprüft werden.

Des Weiteren spielt die Prozessführung eine wichtige Rolle für die Schmelzbaddynamik und das Keyholeverhalten, darüber hinaus hat sie auch Einfluss auf das Verhalten der Plasmadampffackel, welcher durch die Crossdüse entgegen gewirkt wird. In vorangegangenen Veröffentlichungen wurde bereits nachgewiesen, dass eine stechende Prozessführung zu bevorzugen ist. Denn auf diese Weise ist es möglich, der entstehenden Krümmung des Keyholes bei hohen Schweißgeschwindigkeiten mittels angewinkelten Laserstrahleinfalls entgegenzuwirken.

Auffällig war, dass erst in einem  $45^\circ$  Winkel dieser Effekt zum Tragen kam und große Schweißnahtfestigkeiten erreicht wurden. Die Versuche mit  $25^\circ$  waren zu instabil und ausreißerbehaltet. Zudem wurde eine hinreichende Belastbarkeit der Nähte nur in seltenen Fällen nachgewiesen.

Die von [12] aufgestellte These, dass die bei schräger Lasereinstrahlung ab  $45^\circ$  die Crossdüse tendenziell in die vom Laserstrahl abgewandte Richtung ausbildet und da-

durch einen kleineren Effekt auf den Schweißprozess ausübt, kann durch die durchgeführten Versuchsreihen bejaht werden. Die Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften der Nähte mit bzw. ohne Crossdüse sind bei einer 45° Einstrahlung sehr gering. Wobei die Werte unter Verwendung der Crossdüse leicht erhöht sind. Humpingeffekte wurden bei diesen Prozessparametern ebenfalls nicht erkannt. Allerdings muss die Annahme erweitert werden. Denn erst Materialdicken von >2,0 mm liefern die erwarteten Ergebnisse. Für kleinere Materialdicken ist ein senkrechter Laserstrahleinfall klar zu bevorzugen.

Zudem wurde gezeigt, welche Schweißparameter eingestellt werden müssen, um in Abhängigkeit des jeweiligen Materials und der jeweiligen Materialdicke die besten Ergebnisse zu erzielen. Im nachfolgenden Diagramm sind die wesentlichen Einflussgrößen auf den Schweißprozess nochmals grafisch zusammengefasst dargestellt. Dabei wurden die Schweißgeschwindigkeit im Verhältnis zur Materialdicke der beiden Werkstoffe X5CrNi18-10 und DC04 und unter Berücksichtigung der Einflussgrößen Galvometerscanner, Crossdüseneinsatz und Lasereinstrahlwinkel untersucht.

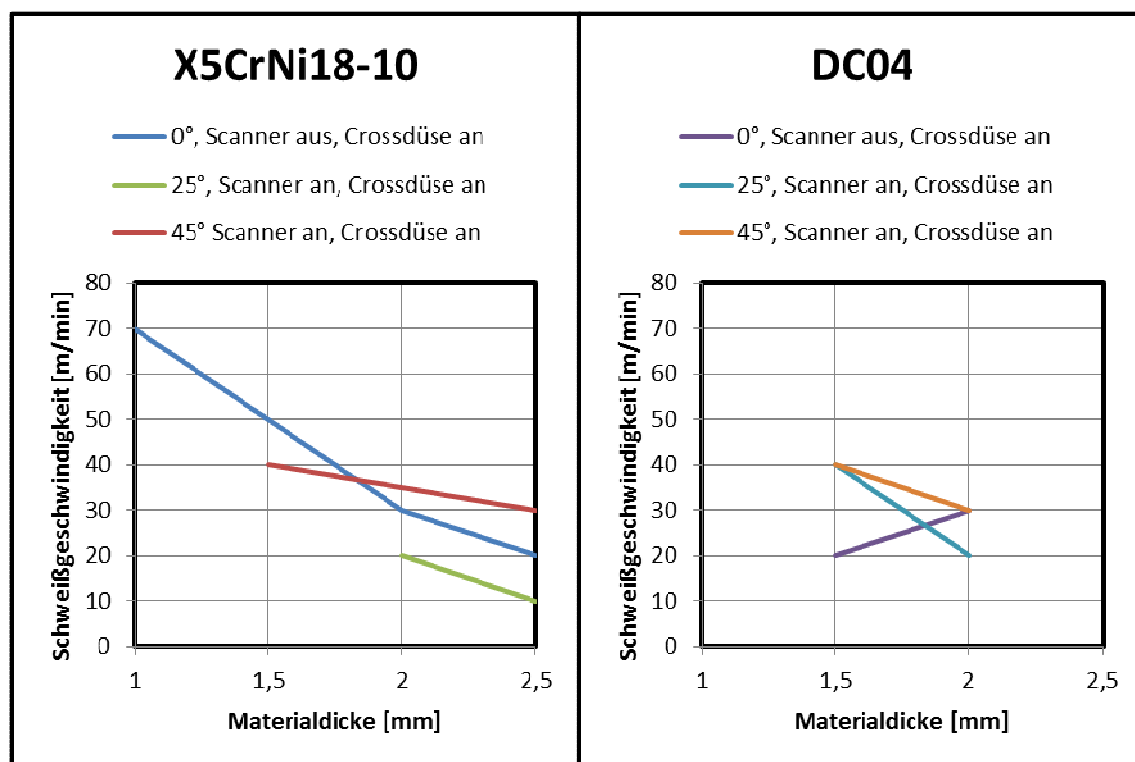


Abb. 5-13: Darstellung der Schweißgeschwindigkeit im Verhältnis zur Materialdicke für X5CrNi18-10 und DC04 mit den Parametern Scanner- und Crossdüseneinsatz sowie Lasereinstrahlwinkel

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Hochgeschwindigkeits- Laserstrahlschweißen mit überlagerter Bahnbewegung untersucht.

Zu Beginn wurde dafür ein eigens entwickelter Schweißkopf konstruiert und aufgebaut. Dieser dient als Basis für die nachfolgenden Experimente mit dem 3KW Singlemode Faserlaser. Diese Entwicklung zeichnet besonders aus, dass es gelang, trotz kompakter Bauform und eng bemessenem Bauraum alle notwendigen Komponenten und Funktionen zu integrieren und darüber hinaus eine hinreichende Variabilität zu gewährleisten.

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden zunächst die allgemeinen Randbedingungen definiert, um auf diese Weise zuverlässige und vergleichbare Untersuchungsergebnisse zu erhalten. Dies beinhaltet unter anderem die Charakteristika der verwendeten Ausrüstung, die Strahleigenschaften, Hinweise zu den verwendeten Werkstoffen sowie Informationen zu den wesentlichen Schweißprozessparametern.

Als erstes Experiment wurde das Schweißen mit überlagerter (im konkreten Fall gependelter Bahnbewegung) untersucht. Hierfür wurden zunächst allgemeine Zusammenhänge zwischen der lokal begrenzten Wirkzone des Laserstrahls und der notwendigen Spaltüberbrückbarkeit bei lasergeschnittenen Körperkanten mit einer durchschnittlichen Oberflächenrauheit von 30 bis 50  $\mu\text{m}$  beschrieben. War es in vorangegangenen Veröffentlichung noch notwendig, eine aufwändige Nahtvorbereitung durch extra Arbeitsgänge wie bspw. Schleifen durchzuführen, ist es mit den modernen Scannersystemen nun möglich, Fügespalten von bis zu 100  $\mu\text{m}$  wirksam zu überbrücken.

Um dies auch praktisch umzusetzen, war es im weiteren Verlauf notwendig, die Amplitude der sinusförmigen Bahnbewegung über eine Variation der Frequenz- Spannungs- Äquivalente dahingehend zu beeinflussen, dass eine Auslenkung von ca. 125  $\mu\text{m}$  wiederholgenau erreicht wird.

Des Weiteren wurden verschiedene Einflussgrößen, die Auswirkungen auf den Schweißprozess und die Einschweißtiefe haben, untersucht. Dazu wurde der Zusammenhang zwischen Material, Materialstärke, Schweißgeschwindigkeit und Einfallswinkel des Laserstrahls, welche entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten des Keyholes haben, veranschaulicht. Zudem wurde der Einfluss der Crossdüse auf die entstehenden Plasmadampffackel untersucht.

In den weiterführenden Untersuchungen wurden auf Grundlage dieser Erkenntnisse Blindschweißungen unter eine Variation diverser Schweißparameter wie Schweißge-

schwindigkeit, Einsatz von Scanner und Crossdüse, Einfallswinkel des Laserstrahls, Materialstärke und Werkstoffauswahl durchgeführt. Aus diesen Schweißversuchen gingen dann Makroschliffproben hervor, welche Erkenntnisse zur Einschweißtiefe, Form und Beschaffenheit der Schweißnähte und deren Oberfläche und der Prozessstabilität lieferten. Die Auswertung dieser Daten im Kapitel 5 *Ergebnisse und Auswertung* zeigt sowohl Schweißfehler wie Nahtüberhöhung, unzureichende Durchschweißung, Wurzelrückfall, sowie Poren und Risse im Schweißgut und entlang der Wärmeeinflusszone. Mithilfe der Ergebnisse der Makroschliffproben zur Einschweißtiefe der jeweiligen Versuchsreihen konnte eine Selektierung der relevanten Proben vorgenommen werden, die für Festigkeitsuntersuchungen wie Zug- und Härteprüfung geeignet sind.

Um einen Einblick in das Werkstoffverhalten zu erhalten, wurden metallurgische Untersuchungen in Form der Anfertigung von Mikroschliffproben durchgeführt. Dabei wurde sich an die Vorgaben der DIN EN ISO 17639 gehalten und die Beobachtungen und Interpretationen der grafischen Darstellung der Werkstoffbereiche: Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Schweißgut zusammengefasst. Ebenfalls wurde eine Mikrohärtemessung nach DIN EN ISO 6507 durchgeführt mit dem Ergebnis, dass der Werkstoff X5CrNi18-10 nicht zu signifikanten Härteunterschieden zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut neigt, sondern lediglich chargenabhängige geringfügige Differenzen aufweist. Anders ist es beim DC04, dieser verfügt ebenfalls über chargenabhängige Härten im Grundwerkstoff, jedoch ist zudem eine deutliche Aufhärtung des Werkstoffes im Bereich der Wärmeeinflusszone und nochmal gesteigerte Härtewerte im Schweißgut nachgewiesen worden. Diese Aufhärtung kann die Belastbarkeit der Schweißnähte negativ beeinflussen, was in Dissens zu den Aussagen des Herstellers über die gute Schweißbarkeit des Werkstoffes bedingt durch den geringen Kohlenstoffanteil steht. Um genaue Aussagen über die Qualität und die Belastbarkeit der Schweißnähte treffen zu können war es notwendig, eine selektierte Auswahl an Makroschliffproben als Zugprobe anzufertigen. Dabei, sowie im Prozess der Zugprüfung, wurde sich strikt an die Vorgaben der DIN EN ISO 6892-1 gehalten. Jede Probe wurde in dreifacher Ausführung angefertigt und gezogen, um dadurch die statistische Sicherheit zu erhöhen. Die nachgewiesenen Festigkeitswerte der einzelnen Versuchsreihen wichen stark voneinander ab. Dennoch war es möglich, Trends zu erkennen und Zusammenhänge abzuleiten. So sinkt die maximal mögliche Schweißgeschwindigkeit exponentiell mit ansteigender Materialdicke ab. Dabei konnte eine im Schnitt um 10 m/min gesteigerte Geschwindigkeit beim X5CrNi18-10 gegenüber dem DC04 erreicht werden. Für Blechstärken von  $\leq 1,0$  mm wirkt sich die überlagerte Bahnbewegung negativ aus, sodass hier eine lineare Bahnbewegung sinnvoll ist. Ebenfalls negativ wirkt eine winkelabhängige Lasereinstrahlung bei geringen Blechstärken. Hier ist eine senkrechte Einstrahlung klar zu empfehlen. Bei der untersuchten Materialstärke von 1,5 mm muss der Werkstoff getrennt betrachtet werden. Beim X5CrNi18-10 wurden die höchste ermittelte Festigkeit von ca. 88 % des Grundwerkstoffes bei 50 m/min bei senkrechter Kopfeinstellung erzielt, während beim DC04 eine 45° Einstrahlung mit überlagerter Bahn-



bewegung die besten Ergebnisse lieferte. Bei Materialstärken von über 2,0 mm waren die Festigkeitswerte, aufgrund des besseren Verhältnisses von Fügespalt zu Materialdicke und der geringeren Geschwindigkeiten sowohl bei senkrechter Einstrahlung als auch bei 45° Einstrahlung sehr gut belastbar und übertrafen überwiegend die Werte des Grundwerkstoffs. Die Einstrahlung mit 25° wies ein nichtlineares Verhalten auf. Die Werte streuten oft, auch innerhalb eines Parametersatzes. Somit stellt diese Winkereinstellung einen Übergangsbereich dar zwischen senkrechter Einstrahlung mit linearer Bahnbewegung und 45° Einstrahlung mit überlagerter Bahnbewegung.

Diese Arbeit stellt noch lange nicht das Ende der möglichen Untersuchungen auf diesem Forschungsgebiet dar. Die Forschung zur Laserstrahlbearbeitung mit überlagerter Bahnbewegung reicht in vielerlei Richtungen. Die hier untersuchte Lösung durch eine Kombination aus Galvometerscannersystem und Linearachse ist nur eine Möglichkeit zur Verbindung von Stahlblechen im Stumpfstoß. Ebenfalls ist es möglich, über eine Kombination mehrerer Scannersysteme sowohl die Vorschubbewegung in X- und Y-Richtung zu realisieren, als auch eine überlagerte Bahnbewegung in Form von Sinus- oder Rechteckpendelung bzw. mittels einer oszillierenden zu generieren. Dies hätte den Vorteil, dass das Werkstück keine Relativbewegung vollziehen muss, was bei größeren Bauteilen von hohem Nutzen ist. Diese Variante stellt jedoch enorme Ansprüche an die Ausrüstung zur Strahlführung und Formung sowie die Bauteilausrichtung. Besonders interessant sind auch die Weiterentwicklungen der Laserquellen. Besonders Faserlaser gewinnen in Forschung und Industrie stetig an Bedeutung. Faserlaser mit einer Leistung von 10 bis 15 KW sind heute keine Seltenheit mehr. Jedoch stehen experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit derart hohen Leistungen in Kombination mit sehr guten Strahlqualitäten noch am Anfang. Die aktuellen Forschungen tendieren auch dazu, den Versuch zu unternehmen, unterschiedliche Werkstoffe wie bspw. Stahl und Kupfer wirksam miteinander zu verschweißen.

Die in dieser Diplomarbeit untersuchte Kombination aus Singlemode Faserlaser, Linearachssystem, Galvometerscannersystem und drehbarem Schweißkopf stellt eine seriennahe Variante des Laserschweißens mit überlagerter Bahnbewegung dar und wäre ebenfalls sehr gut automatisierbar. Es ist darüber hinaus möglich, den Schweißprozess durch die Verwendung geeigneter Schutzgase, leistungsstärkeren Laserquellen, vibrationsfreien Spannhalterungen ohne Kantenversatz sowie leistungsfähigeren Scannersystemen mit geringerer Massenträgheit und daraus resultierender schnellerer Strahlablenkung, weiter zu optimieren. Eine weitere Maßnahme zur Prozessoptimierung stellt die thermische Beeinflussung des Probenwerkstoffs durch Vorwärmen und eine Überwachung des Abkühltemperatur - Zeitverlaufes dar.

## Quellenangabe

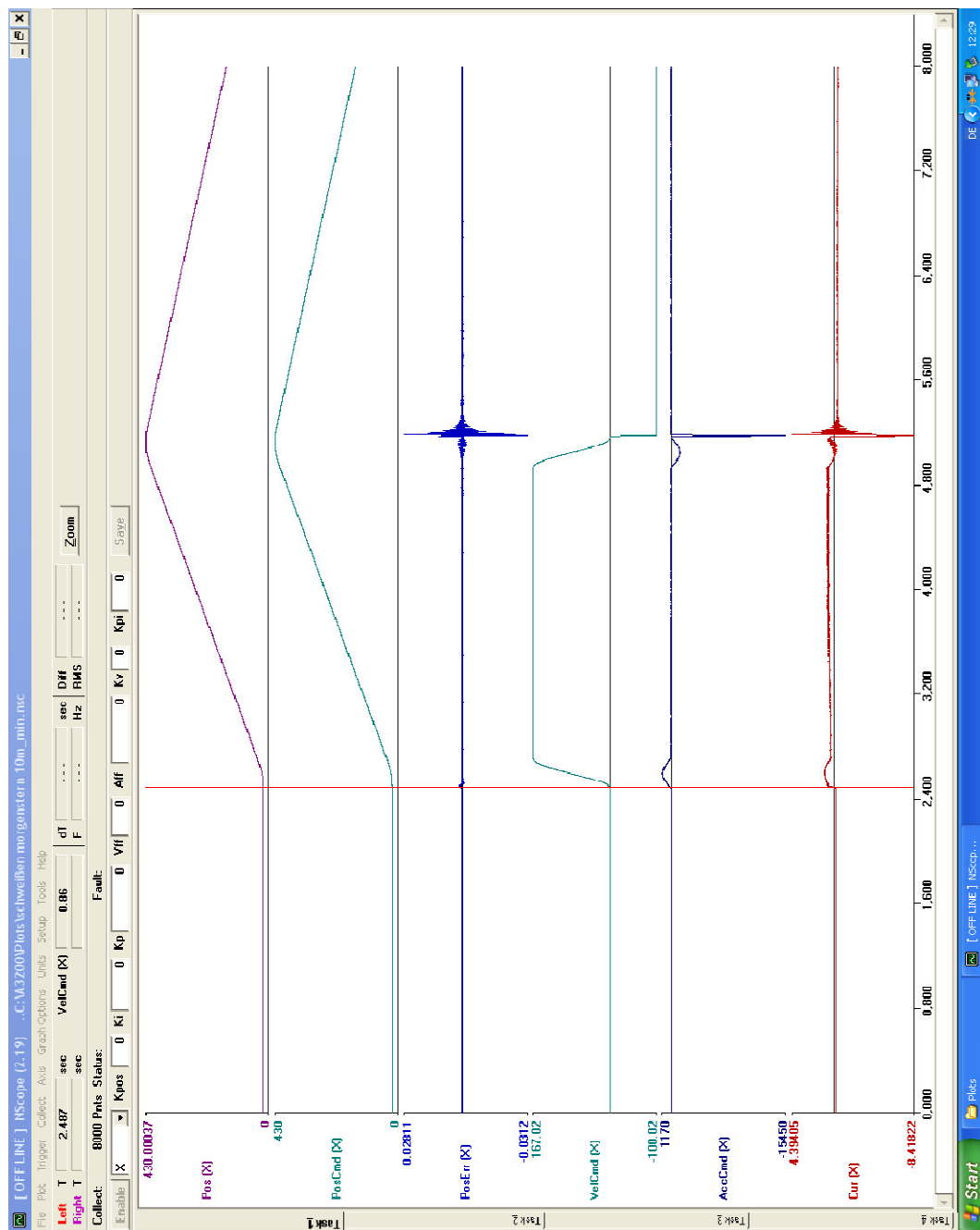
- [1] Norm DIN EN 1011-6: *Schweißen- Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe - Teile 6: Laserschweißen*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 2006, S. 10-11
- [2] TRUMPF GmbH u. Co. KG: *Scannerschweißen – Hochproduktive Bearbeitung ohne Nebenzeiten*. URL: <http://www.trumpflaser.com/de/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/scannerschweissen.html>, Ditzingen (Deutschland), 07.09.2015
- [3] A. Müller, S.F Goecke, F.Albert: *Nahtgeführtes Laserstrahl –Remoteschweißen mit Strahloszillation*. Brandenburg University of Applied Science, TU Berlin, Scansonic MI GmbH, Berlin (Deutschland), 2014, S. 2-7
- [4] Christoph Markmann: *The Influence of Various Laser Welding Parameters on the Weld Seam Geometry*. Masterarbeit, Luleå University of Technology, IFSW Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart, Stuttgart (Deutschland), 2010, S. 21-41
- [5] J. Karlsson, A. Kaplan: *Fibre Laser Welding for Ligthweight Design*. Luleå University of Technology, Luleå (Schweden), 2009
- [6] M. Krestzsch, J. Standfuss, A. Klotzbach: *Laser Beam Welding with High-Frequency Beam Oscillation - Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers*; Fraunhofer IWS Dresden; Dresden (Deutschland), 2011
- [7] TRUMPF GmbH u. Co. KG: *Hybridschweißen*. URL: <http://www.trumpflaser.com/de/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/scannerschweissen.html>, Ditzingen (Deutschland), 07.09.2015
- [8] S. Katayama, Y. Kawahito, M. Mizutani: *Latest progress in Performance and Understanding of Laserwelding*. JWRI Joining and Welding Research Institut Osaka University, Osaka (Japan), 2012
- [9] N.Stache: *Simulation des Strahlengangs einer telezentrischen F-Theta-Optik*. Studienarbeit. Lehrstuhl für Bildverarbeitung – Institute of Imaging and Computer Vision, Aachen (Deutschland), 2013
- [10] SCANLAB AG: Datenblatt dynAxis/ dynAxis3: *System Components for Integrators*. Puchheim (Deutschland), 2015
- [11] IPG Laser GmbH: Benutzerhandbuch: *YLR-3000-SM Ytterbium Faser Laser*. Burbach (Deutschland), 2015

- 
- [12] S. Schwind: *Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit einem 3 kW Monomode-Faserlaser*. Masterarbeit, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau, Mittweida, 2013. 72 S.
- [13] M. Wagner: *Grundlagenuntersuchung zum Hochgeschwindigkeitslasertiefschweißen mit überlagerter Bahnbewegung*. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau, Mittweida, 2014. 78 S.
- [14] ThyssenKrupp Materials International GmbH: Datenblatt: *1.4301, X5CrNi18-10*. Mülheim an der Ruhr (Deutschland), 2007
- [15] Norm DIN 51009: *Optische Atomspektralanalyse – Allgemeine Grundlagen und Begriffe*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 2013
- [16] Salzgitter Flachstahl GmbH: Datenblatt: *DC04 – Weiche Stähle zum kaltumformen*. Salzgitter (Deutschland), 2014
- [17] V. Schulz, T. Seefeld, F. Vollertsen: *Spaltüberbrückbarkeit beim Schweißen mit oszillierendem Laserstrahl*. BIAS- Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Bremen (Deutschland), 2014
- [18] F. Oefele: *Remote- Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen*. Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften IWB, München (Deutschland), 2012, S. 20-23
- [19] R. Fabbro, K. Chouf: *Keyhole modelling during laser welding*. Journal of Applied Physics, Institut of Physics Publishing, Vol. 87, Nummer 9, St. Ouenl'Aumône (France), 2000, S. 4075-4080
- [20] Silvent Central Europe GmbH: Produktvergleich Technische Daten 705L / 973: URL: [http://www.silvent.com/de/produkte/?compare=&compare\[\]=2434&compare\[\]=2281](http://www.silvent.com/de/produkte/?compare=&compare[]=2434&compare[]=2281), Borås (Schweden), 11.10.2015
- [21] Norm DIN EN ISO 13919-1: *Elektronen- und Laserstrahl- Schweißverbindungen, Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 1996
- [22] Norm DIN EN ISO 6507: *Metallische Werkstoffe- Härteprüfung nach Vickers - Teile 1-4*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 2005
- [23] Norm DIN EN ISO 6892-1: *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 2009
- [24] Norm DIN 50125 – H 20x80: *Beispiele für Maße von Zugproben Form H*. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin (Deutschland), 2009

## Anlagenverzeichnis

<i>Anlage A:</i> Achsenbeschleunigung AEROTECH bei 10 m/min Vorschubgeschwindigkeit.....	XIII
<i>Anlage B:</i> Mögliche Gefügebestandteile X5CrNi18-10 nach Schöfflerdiagramm .....	XIV
<i>Anlage C:</i> Erklärung der Formelzeichen aus DIN EN ISO 13919-1 .....	XV
<i>Anlage D:</i> Bewertung der Schweißnähte auf Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1.....	XVI
<i>Anlage E:</i> Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit.....	XX

# Anlage A



Anlage A: Achsenbeschleunigung AEROTECH bei 10 m/min Vorschubgeschwindigkeit

## Anlage B

### Mögliche Gefügebestandteile nach dem Schaeffler Diagramm

1.4301

Formeln für Berechnung :

Chrom-Äquivalent =  $\%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb + 2 \times \%Ti$

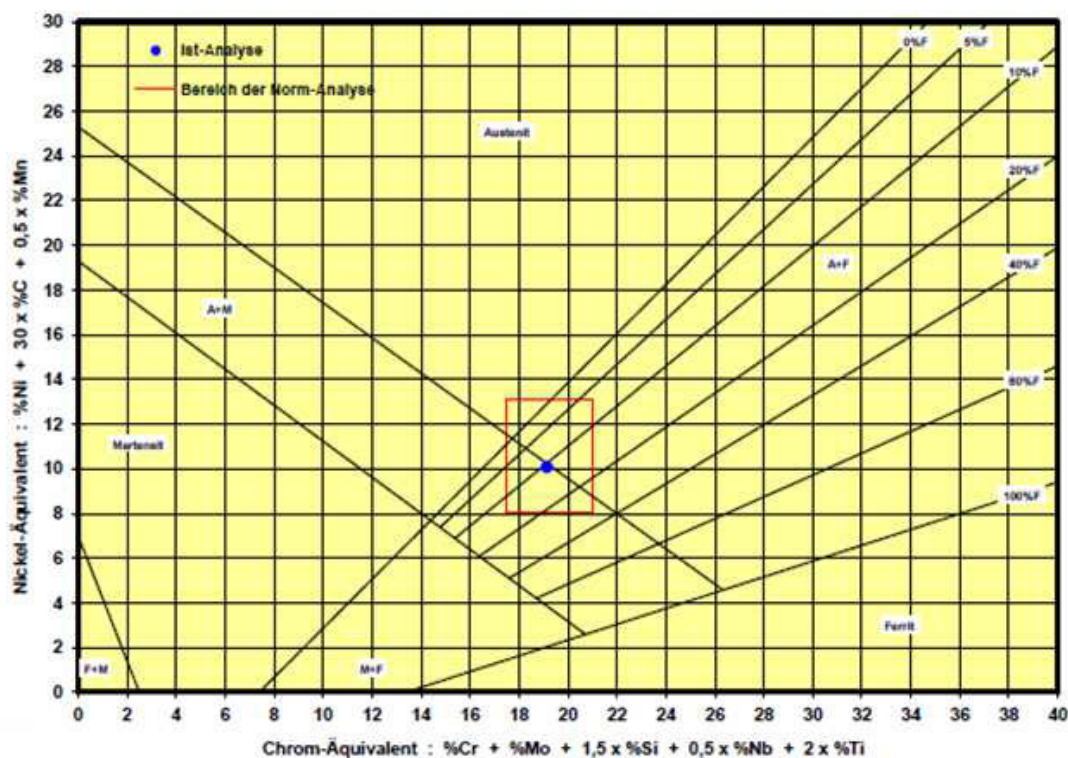
Nickel-Äquivalent =  $\%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn$

Freie Eingabefelder :

Hellblau hinterlegte Zellen

Werkstoffnummer / Charge	1.4301		
Besonderheiten	Probe 12,0 mm Ø ; Analyse aus dem Kernbereich		
Zusammensetzung	Ist-Analyse %	Bereich der Norm-Analyse	
		Min. %	Max. %
Kohlenstoff - C	0,045	0,000	0,070
Silizium - Si	0,300	0,000	1,000
Mangan - Mn	1,100	0,000	2,000
Chrom - Cr	18,410	17,500	19,500
Molybdän - Mo	0,250	0,000	0,000
Nickel - Ni	8,180	8,000	10,000
Niob - Nb	0,013	0,000	0,000
Titan - Ti	0,008	0,000	0,000
Berechnete Äquivalente	Ist-Analyse	Bereich der Norm-Analyse	
		Min.	Max.
Nickel-Äquivalent	10,08	8,00	13,10
Chrom-Äquivalent	19,13	17,50	21,00

1.4301



Anlage B: Mögliche Gefügebestandteile X5CrNi18-10 nach Schaefflerdiagramm

## Anlage C

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
b	Breite der Schweißnaht	mm
d	max. Maß einer Unregelmäßigkeit	mm
f	Summe der Hohlraumprojektionsflächen	mm
h	Größe einer Unregelmäßigkeit (Höhe, Tiefe)	mm
l	Länge einer Unregelmäßigkeit (gemessen in jede Richtung)	mm
L	zu bewertende Schweißnahtlänge (Schweißprüflänge)	mm
$\Delta L$	Abstand zwischen zwei Unregelmäßigkeiten	mm
$L_c$	Länge der Porenanhäufung	mm
s	Werkstückdicke	mm
t	Schmelzzonentiefe	mm

Anlage C: Erklärung der Formelzeichen aus DIN EN ISO 13919-1

# Anlage D

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten					
		1) Risse	2) Endkraternisse	3) Porosität und Poren	4) Forenester und Porenzellen
					a) Höchstmaß für Einzelpore b) Höchstmaß für $\Sigma$ Projektionsflächen
Bewertungsgruppen	Niedrig D	Nicht zulässig	örtliche Endkraternisse sind zulässig	I oder h $\leq 0,5s$ oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend f < 6%	I oder h $\leq 0,5s$ oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend f < 6%
		Nicht zulässig	Nicht zulässig	I oder h $\leq 0,4s$ oder 3mm, kleinerer Wert ist zutreffend f $\leq 2\%$	I oder h $\leq 0,4s$ oder 3mm, kleinerer Wert ist zutreffend f $\leq 2\%$
		Nicht zulässig	Nicht zulässig	I oder h $\leq 0,3s$ oder 2mm, kleinerer Wert ist zutreffend f $\leq 0,7\%$	I oder h $\leq 0,3s$ oder 2mm, kleinerer Wert ist zutreffend f $\leq 0,7\%$
	Material	Materialdicke	Bewertung der Schweißnähte		
X5CrNi18-10	1,0 mm	Keine	D	Keine	Keine
	1,5 mm	B	C	D	D
	2,0 mm	C	C	D	D
	2,5 mm	C	C	C	B
DC04	1,5 mm	B	B	B	B
	2,0 mm	B	B	B	B

Anlage D: Bewertung der Schweißnähte auf Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1



Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten							
Bewertungsgruppen		4) Porennester und Porenzellen		5) Lunker und Endkraterlunker	6) Feste Einschlüsse	7) Bindefehler	
		c) Abstand $\Delta L$ zwischen Einzelporen	d) Porenanhäufungen				
				0,25s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_c \leq 2s$	I oder $h \leq 0,5s$ oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 6\%$	Nicht relevant
		Mittel C	0,5s oder 10mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_c \leq s$	I oder $h \leq 0,4s$ oder 3mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 2\%$	Nicht relevant	Nicht zulässig
		Hoch B	0,5s oder 15mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_c \leq s$	I oder $h \leq 0,3s$ oder 2mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 0,7\%$	Nicht relevant	Nicht zulässig
Material	Materialdicke	Bewertung der Schweißnähte					
X5CrNi18-10	1,0 mm	Keine	Keine	Keine	Keine	B	
	1,5 mm	D	D	C	Keine	B	
	2,0 mm	C	D	D	Keine	B	
	2,5 mm	B	D	B	Keine	B	
DC04	1,5 mm	B	B	B	B	B	
	2,0 mm	B	B	B	B	B	

Anlage D: Fortsetzung Bewertung der Schweißnähte auf Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten						
Bewertungsgruppen	8) Ungenügende Durchschweißung	10) Randkerben	11) Nahtüberhöhung	12) Wurzelüberhöhung	13) Kantenversatz	
	h ≤ 0,15s oder 1mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,15s oder 1mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,3s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,3s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 6%	h ≤ 0,25s oder 3mm, kleinerer Wert ist zutreffend	
	Nicht zulässig	h ≤ 0,10s oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,2s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,2s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 2%	h ≤ 0,15s oder 2mm, kleinerer Wert ist zutreffend	
	Nicht zulässig	h ≤ 0,05s oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,15s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	h ≤ 0,2mm + 0,15s oder 5mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 0,7%	h ≤ 0,10s oder 2mm, kleinerer Wert ist zutreffend	
Material	Materialdicke	Bewertung der Schweißnähte				
X5CrNi18-10	1,0 mm	B	nicht auswertbar	B	D	B
	1,5 mm	B	B	B	C	B
	2,0 mm	B	B	B	C	B
	2,5 mm	B	B	B	B	B
DC04	1,5 mm	B	B	B	C	B
	2,0 mm	B	B	B	C	B

Anlage D: Fortsetzung Bewertung der Schweißnähte auf Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten			
Bewertungsgruppen	Material	15) Nahtunterwölbung	18) Schweißspritzer
		16) Wurzelrückfall	
Niedrig D		$h \leq 0,3s$ oder 1mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,3s$ oder 1mm, kleinerer Wert ist zutreffend
		$h \leq 0,2s$ oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2s$ oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend
		$h \leq 0,1s$ oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,1s$ oder 0,5mm, kleinerer Wert ist zutreffend
Mittel C			
Hoch B			
Material		Bewertung der Schweißnähte	
X5CrNi18-10	Materialdicke		
	1,0 mm	C	B
	1,5 mm	C	B
	2,0 mm	B	B
DC04	2,5 mm	B	B
	1,5 mm	B	B
	2,0 mm	B	B
		Sporadisches Auftreten von Schweißspritzern	

Anlage D: Fortsetzung Bewertung der Schweißnähte auf Unregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1

# Anlage E

Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossdiase	Geschwindigkeit	Fmax <sub>g</sub> [N]	Rm <sub>g</sub> [MPa]	%	A <sub>g</sub> [%]	%
1.4301 - 1,0mm	0°	An	An	50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				80			unbrauchbar		
				90			unbrauchbar		
	0°	Aus	An	50			ungeprüft aber geeignet		
				60			ungeprüft aber geeignet		
				70	7531,7	602,6	120,5	21,0	46,7
				80	5177,7	414,2	82,8	9,4	20,8
				90			unbrauchbar		
	25°	An	An	50	2846,7	227,7	45,5	0,2	0,4
				60	2976,7	238,2	47,6	0,1	0,2
				70	2759,3	223,9	44,8	0,1	0,2
				80			unbrauchbar		
				90			unbrauchbar		
	45°	An	An	50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				80			unbrauchbar		
				90			unbrauchbar		
	45°	An	Aus	50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				80			unbrauchbar		
				90			unbrauchbar		

Anlage E: Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit

Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossluse	Geschwindigkeit	Fmax, [N]	Rm, [MPa]	%	A <sub>5</sub> [%]	%
1.4301 - 1,5mm	0°	Ar	An	30					unbrauchbar
				40					unbrauchbar
				50					unbrauchbar
				60					unbrauchbar
				70					unbrauchbar
	0°	Aus	An	30					ungeprüft aber geeignet
				40					ungeprüft aber geeignet
				50	8228,5	438,9	87,8	8,4	18,6
				60	6759,7	360,5	72,1	9,0	20,0
				70					unbrauchbar
	25°	Ar	An	30					ungeprüft aber geeignet
				40	5889,3	314,1	62,8	0,8	1,9
				50					unbrauchbar
				60					unbrauchbar
				70					unbrauchbar
	45°	Ar	An	30					ungeprüft aber geeignet
				40	7359,3	392,5	73,5	4,2	9,3
				50	5055,0	322,9	64,6	9,5	21,2
				60					unbrauchbar
				70					unbrauchbar
	45°	Ar	Aus	30					ungeprüft aber geeignet
				40					ungeprüft aber geeignet
				50	6135,7	327,2	65,4	1,5	3,3
				60					unbrauchbar
				70					unbrauchbar

Anlage E:Fortsetzung Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit

Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossdüse	Geschwindigkeit	Fmax <sub>90</sub> [N]	Rm <sub>90</sub> [MPa]	%	A <sub>90</sub> [%]	%
1.0333 - 1,5mm	0°	An	An	30			unbrauchbar		
				40			unbrauchbar		
				50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				30			unbrauchbar		
				40			unbrauchbar		
	0°	Aus	An	50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				30	4033,7	215,1	79,7		15,5
				40	3047,0	162,5	32,5		81,3
				50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
	25°	An	An	30			unbrauchbar		
				40			unbrauchbar		
				50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				30	5162,0	275,3	102,0	11,8	31,1
				40			unbrauchbar		
	45°	An	An	50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				30			unbrauchbar		
				40			unbrauchbar		
				50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
	45°	An	Aus	70			unbrauchbar		
				30	5276,3	281,4	104,2	20,7	54,4
				40	4767,7	254,3	94,2	8,5	22,5
				50			unbrauchbar		
				60			unbrauchbar		
				70			unbrauchbar		
				30			unbrauchbar		

Anlage E:Fortsetzung Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit

Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossdüse	Geschwindigkeit	$F_{max,p}$ [N]	$R_{m,p}$ [MPa]	%	$A_p$ [%]	%
1.0338 - 2,0mm	0°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	4021,5	160,9	59,6	0,1	0,3
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	0°	Aus	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	6298,5	252,0	93,3	24,5	64,5
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	25°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	7414,7	296,6	109,8	28,1	73,9
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	45°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	7946,7	317,9	117,7	31,4	82,7
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	45°	An	Aus	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	7865,0	314,6	116,5	30,9	81,3
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				

Anlage E: Fortsetzung Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit



Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossduse	Geschwindigkeit	Fmax <sub>g</sub> [N]	Rm <sub>g</sub> [MPa]	%	A <sub>g</sub> [%]	%
1.4301 - 2,0mm	0°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	3806,3	152,2	30,4	0,5	1,2
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	0°	Aus	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	ungeprüft aber geeignet				
				30	14405,7	576,2	115,2	33,9	75,3
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	25°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	12.410,0	496,4	99,3	15,6	34,6
				30	10.116,3	404,6	80,9	6,7	15,0
				40	2.988,5	119,6	23,9	1,9	4,1
				50	unbrauchbar				
	45°	An	An	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	14244,7	569,8	114,0	20,8	46,3
				30	unbrauchbar				
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				
	45°	An	Aus	10	ungeprüft aber geeignet				
				20	ungeprüft aber geeignet				
				30	13611,3	544,4	108,9	17,2	38,1
				40	unbrauchbar				
				50	unbrauchbar				

Anlage E:Fortsetzung Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit



Material	Einfallswinkel Laserstrahl	Scanner	Crossdüse	Geschwindigkeit	Fmax <sub>y</sub> [N]	Rm <sub>y</sub> [MPa]	%	A <sub>y</sub> [%]	%
1.4301 - 2,5mm	0°	An	An	10				ungeprüft aber geeignet	
				20				ungeprüft aber geeignet	
				30	5035,0	289,2	57,8	6,2	13,8
				40	2169,5	69,5	13,9	0,5	1,0
	0°	Aus	An	5				ungeprüft aber geeignet	
				10				ungeprüft aber geeignet	
				20	17514,3	560,4	112,1	35,6	79,1
				30				unbrauchbar	
				40				unbrauchbar	
	25°	An	An	5				ungeprüft aber geeignet	
				10	19233,7	615,5	123,1	5,7	114,8
				20				unbrauchbar	
				30				unbrauchbar	
				40				unbrauchbar	
	45°	An	An	5				unbrauchbar	
				10				unbrauchbar	
				20				unbrauchbar	
				30				unbrauchbar	
				40				unbrauchbar	
	45°	An	Aus	5				ungeprüft aber geeignet	
				10				ungeprüft aber geeignet	
				20	19000,0	603,0	121,6	26,7	59,3
				30				unbrauchbar	
				40				unbrauchbar	

Anlage E:Fortsetzung Untersuchungen zur Schweißnahtfestigkeit

## Danksagung

Für das Gelingen meiner Diplomarbeit schulde ich vielen Menschen herzlichen Dank.

Zuerst möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Jan Drechsel danken, der es mir ermöglichte die vorliegende Diplomarbeit am Laserinstitut der Hochschule Mittweida durchführen zu können.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner für das Vertrauen das er mir entgegengebracht hat. Er hat mir in der Planung und Gestaltung meiner Untersuchungen viel Freiraum gelassen und mir bei der Anfertigung meiner Arbeit sehr geholfen.

Für das Gelingen meiner Diplomarbeit danke ich auch einen Kollegen die maßgeblich beteiligt waren, namentlich:

Dipl.-Ing. Lars Hartwig

M.Sc. Sebastian Weinhold

Alexander Thum

Dipl.-Ing. Matthias Horn

Dipl.-Ing. Andreas Gruner

Sie standen mir mit Rat und Tat zur Seite und sorgten stets für eine gute Arbeitsatmosphäre.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie bedanken für deren Unterstützung in jeglicher Hinsicht während meiner gesamten Studienzeit.

Mittweida, Februar 2016

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 12.02.2016

David Morgenstern